

PENGANTAR

Dengan mengucapkan Alhamdulillah Rabbil'alamin, puji syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, ridho, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul **“Perilaku Seismik Kolom Beton Bertulangan Ringan”** sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk memperoleh gelar Master Teknik di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Penulis menyadari bahwa penulisan tesis ini tidak akan terselesaikan tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak karena itu ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah dengan rela meluangkan waktunya untuk membantu penulis dalam proses penulisan tesis dan juga dengan ikhlas memberikan bimbingan, arahan, masukan, dan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D serta Bapak Dr. Ir. Wisnumurti, MT. selaku dosen pembimbing I dan dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan bantuan, bimbingan, masukan dan arahan selama penyusunan tesis ini;
2. Bapak Dr. Eng. Achfas Zacoeb, ST., MT. serta Ibu Dr. Eng. Devi Nuralinah, ST., MT. selaku penguji tesis yang selalu memberikan saran dan perbaikan dalam penyusunan tesis ini;
3. Ayah Yunan Rusdianto, Ibu S. Chamidah Sri H., Kakak Anisa Imaniar E. P. dan Asri Samsiar I. atas segala bantuan, dukungan dan do'a serta dorongan semangat hingga tesis ini dapat terselesaikan;
4. Rekan seperjuangan; Chaniva Adnin, Desi, Dufanti, Edo, Karina dan Stefan yang telah membantu dalam penelitian tesis ini, serta Ganeswana Nova P. atas segala bantuan dan semangat yang diberikan;
5. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian tesis ini baik secara langsung dan tidak langsung yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis berharap semoga tesis ini bermanfaat bagi pembaca dan dapat memberikan sumbangan pikiran bagi pihak-pihak lain khususnya mahasiswa jurusan Teknik Sipil. Segala kritik dan saran sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tesis ini, karena penulis menyadari bahwa penulisan tesis ini masih jauh dari sempurna dan masih memiliki banyak kekurangan.

Malang, Januari, 2018

Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah	4
1.3 Rumusan Masalah	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Tujuan Penelitian.....	6
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kapasitas Drift.....	7
2.1.1 Kapasitas Drift Ultimit (Ultimate Drift Capacity)	7
2.1.2 Kapasitas <i>Drift</i> Leleh (<i>Yield Drift Capacity</i>).....	10
2.2 Kapasitas Lentur, Geser dan Aksial Kolom	11
2.2.1 Kapasitas Lentur	11
2.2.1.1 Kapasitas Lentur Menggunakan Metode Klasik	11
2.2.1.2 Kapasitas Lentur Menggunakan Analisa Momen-kurvatur	12
2.2.2 Kapasitas Geser	16
2.2.3 Kapasitas Aksial	22
2.3 Diagram Interaksi Kolom Beton Bertulang.....	22
2.4 Pengaruh Parameter Terhadap Perilaku Kolom	23
2.4.1 Tulangan Tranversal	24
2.4.1.1 Rasio Luas (<i>Area Ratio</i>) Tulangan Tranversal.....	25
2.4.1.2 Rasio Volume (<i>Volume Ratio</i>) Tulangan Tranversal	26
2.4.2 Tulangan Longitudinal.....	26
2.4.3 Aspek Rasio (<i>Shear Span to Depth Rasio</i>).....	27
2.4.4 Rasio Beban Aksial.....	28

2.5	Sambungan Lewatan Tulangan Longitudinal (<i>Lap Splice</i>).....	29
2.6	Kegagalan Kolom Beton Bertulang Berdasarkan Pola Retak Tipikal	34
2.7	Mekanisme Keruntuhan	36
2.8	Komponen Perpindahan Lateral.....	37
2.8.1	Perpindahan Lentur	38
2.8.2	Perpindahan Yield Penetration.....	40
2.8.3	Perpindahan Geser.....	42
2.9	<i>Drift</i> pada Kegagalan Beban Lateral.....	42
2.9.1	Sezen (2002).....	42
2.9.2	Elwood dan Moehle (2003).....	44
2.9.3	Wibowo (2012)	44
2.10	<i>Drift</i> pada Kegagalan Beban Aksial.....	46
2.10.1	Elwood dan Moehle (2003).....	46
2.10.2	Wibowo (2012)	47
2.11	Model Kekuatan Lateral- <i>Drift</i> untuk Desain	48
2.11.1	<i>Backbone curve model</i>	48
2.11.2	<i>Simplified Code Bi-linear Model</i>	50
BAB III	53
METODOLOGI PENELITIAN	53
3.1	Rancangan Benda Uji.....	53
3.1.1	Dimensi Spesimen Kolom.....	54
3.1.2	Rasio Tulangan Longitudinal	54
3.1.3	Jarak Sengkang.....	55
3.1.4	Sambungan Lewatan Tulangan Longitudinal.....	56
3.2	Deskripsi Beban Uji	58
3.3	Instrumen Penelitian	61
3.4	Pengukuran Komponen Perpindahan Lateral	63
3.4.1	Perpindahan Lentur	63
3.4.2	Perpindahan Geser.....	64
3.5	Prosedur Pengujian	65
3.6	Hipotesa Pengujian	67
3.6	Diagram Alir Penelitian	69

BAB IV	71
PEMBAHASAN	71
4.1 Pengujian Properti Material.....	71
4.1.1 Uji Tekan Beton.....	71
4.1.2 Uji Tarik Tulangan Baja	73
4.2 Pembuatan Benda Uji.....	76
4.3 Perilaku Spesimen Kolom	78
4.3.1 Spesimen Kolom L15C.....	78
4.3.2 Spesimen Kolom L25C.....	82
4.2.2.1 Spesimen Kolom L25C(2)	82
4.2.2.2 Spesimen Kolom L25C(1)	85
4.3.3 Spesimen Kolom M15C	87
4.3.4 Spesimen Kolom M25C	92
4.3.5 Spesimen Kolom L15SB	97
4.3.6 Spesimen Kolom L15SM	102
4.3.7 Spesimen Kolom M15SB	108
4.3.7.1 Spesimen Kolom M15SB(2)	109
4.3.7.2 Spesimen Kolom M15SB(1)	114
4.3.8 Spesimen Kolom M15SM	117
4.3.8.1 Spesimen Kolom M15SM(2)	117
4.3.8.2 Spesimen Kolom M15SM(1)	122
4.4 Distribusi Perpindahan Lentur, Geser dan Penetrasi Leleh.....	126
4.4.1 Perpindahan Lentur.....	126
4.4.2 Perpindahan Geser	129
4.4.3 Perpindahan Penetrasi Leleh.....	131
4.5 Kapasitas Lateral Spesimen Kolom.....	143
4.6 Kapasitas Simpangan Spesimen Kolom	147
4.7 Model Simplifikasi Kurva Beban-Perpindahan.....	150
4.8 Ringkasan	162
BAB V	167
PENUTUP.....	167
5.1 Kesimpulan.....	167

5.2	Saran.....	171
DAFTAR PUSTAKA		173

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Respon beban lateral-perpindahan dari spesimen kolom.....	8
Gambar 2.2	Penentuan perpindahan ultimit dari spesimen kolom	8
Gambar 2.3	Kegagalan geser dan kegagalan aksial spesimen kolom	9
Gambar 2.4	Penentuan perpindahan leleh dari spesimen kolom	10
Gambar 2.5	Analisa penampang melintang untuk menghitung kapasitas momen maksimum	12
Gambar 2.6	Deformasi suatu komponen lentur	13
Gambar 2.7	Analisa fibre section	14
Gambar 2.8	(a). Tampak depan kolom beton bertulang; (b) <i>Truss mechanism</i> ; (c) <i>Arch mechanism</i>	18
Gambar 2.9	Nilai parameter daktilitas perpindahan k	19
Gambar 2.10	Definisi D' untuk kekuatan geser <i>truss mechanism</i>	19
Gambar 2.11	Kontribusi beban aksial terhadap kekuatan geser	19
Gambar 2.12	Nilai parameter daktilitas perpindahan k	20
Gambar 2.13	Diagram interaksi kolom beton bertulang.....	23
Gambar 2.14	Pengaruh jarak antar tulangan transversal terhadap efektifitas kekangan.....	25
Gambar 2.15	Pengaruh beban aksial terhadap kapasitas kurvatur pada kolom beton bertulang (Sezen, 2002).....	29
Gambar 2.16	Spesimen kolom S20MI dengan panjang sambungan lewatan 20 db pada <i>drift</i> 3% (Melek et. al., 2003)	31
Gambar 2.17	Grafik hysteresis beban lateral-perpindahan spesimen kolom S20MI (Melek et. al., 2003)	31
Gambar 2.18	Grafik hysteresis momen-kurvatur (<i>curvature</i>): (a) Spesimen LN; (b) Spesimen LP; (c) Spesimen LO (Pam dan Ho., 2009)	33
Gambar 2.19	Letak dan panjang daerah kritis spesimen kolom: (a) Spesimen LN; (b) Spesimen LP; (c) Spesimen LO (Pam dan Ho., 2009)	34
Gambar 2.20	Kegagalan geser pada kolom beton bertulang.....	35
Gambar 2.21	Kegagalan lentur pada kolom beton bertulang.....	35

Gambar 2.22	Kegagalan lekatan (<i>bond splitting</i>) pada kolom beton bertulang (Alcantara dan Imai, 2000)	35
Gambar 2.23	Klasifikasi mode kegagalan kolom.....	37
Gambar 2.24	Komponen deformasi lateral total pada kolom jepit-jepit	38
Gambar 2.25	(a) Struktur kantilever; (b) Diagram momen; (c) Diagram kurvatur	39
Gambar 2.26	Model reinforcement slip.....	41
Gambar 2.27	Perpindahan saat kegagalan geser berdasarkan model kapasitas geser oleh Sezen (2002)	43
Gambar 2.28	Hubungan antara kapasitas geser beton dan rasio daktilitas.....	45
Gambar 2.29	Faktor reduksi kekuatan $k\mu$	45
Gambar 2.30	Diagram <i>free-body</i> setelah kegagalan geser	47
Gambar 2.31	<i>Backbone curve model</i>	48
Gambar 2.32	<i>Simplified code bi-linear model</i>	51
Gambar 3.1	Penampang benda uji kolom.....	59
Gambar 3.2	(a) Benda uji kolom L15C; (b) Benda Uji kolom L25C	59
Gambar 3.3	(a) Benda uji kolom M15C; (b) Benda Uji kolom M25C.....	60
Gambar 3.4	(a) Benda uji kolom L15SB; (b) Benda Uji kolom L15SM	60
Gambar 3.5	(a) Benda uji kolom M15SB; (b) Benda Uji kolom M15SM	61
Gambar 3.6	<i>Layout LVDT dan dial gauge</i>	62
Gambar 3.7	LVDT dan <i>dial gauge</i> yang telah dipasang pada spesimen.....	62
Gambar 3.8	Perhitungan kurvatur dan rotasi untuk perpindahan lentur.....	64
Gambar 3.9	Perhitungan perpindahan geser menggunakan <i>dial gauge</i>	64
Gambar 3.10	Setting up pengujian	66
Gambar 3.11	<i>Quasi-static lateral loading history</i>	66
Gambar 3.12	Diagram interaksi spesimen kolom.....	67
Gambar 3.13	Diagram alir penelitian	69
Gambar 4.1	Uji tekan silinder beton.....	71
Gambar 4.2	Uji tarik tulangan baja.....	74
Gambar 4.3	Kurva tegangan-regangan tulangan $\phi 6$ mm	75
Gambar 4.4	Kurva tegangan-regangan tulangan $\phi 8$ mm	75
Gambar 4.5	Kurva tegangan-regangan tulangan $\phi 10$ mm	75

Gambar 4.6	(a) Rangkaian tulangan benda uji; (b) Benda uji dipasang dalam bekisting; (c) Pengecoran benda uji.....	77
Gambar 4.7	Kurva histeresis spesimen L15C	79
Gambar 4.8	Kerusakan pada spesimen kolom L15C di berbagai peningkatan <i>drift</i>	80
Gambar 4.9	Tampak spesimen kolom 2L15C pada akhir pengujian (<i>drift</i> 7.0%)	81
Gambar 4.10	Kurva histeresis spesimen L25C	83
Gambar 4.11	Kerusakan pada spesimen kolom L25C di berbagai peningkatan <i>drift</i>	84
Gambar 4.12	Kerusakan pada spesimen kolom L25C di berbagai peningkatan <i>drift</i>	86
Gambar 4.13	Tampak spesimen kolom pada akhir pengujian (<i>drift</i> 4.5%)	87
Gambar 4.14	Kurva histeresis spesimen M15C	88
Gambar 4.15	Kerusakan pada spesimen kolom M15C di berbagai peningkatan <i>drift</i>	89
Gambar 4.16	Tampak spesimen kolom pada akhir pengujian (<i>drift</i> 4.0%)	90
Gambar 4.17	Kerusakan pada spesimen kolom M15C (tampak belakang) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	91
Gambar 4.18	Kurva histeresis spesimen M25C	93
Gambar 4.19	Kerusakan pada spesimen kolom 2M25C di berbagai peningkatan <i>drift</i>	94
Gambar 4.20	Kerusakan pada spesimen kolom 2M25C (tampak belakang) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	95
Gambar 4.21	Tampak spesimen kolom 2M25C pada akhir pengujian (<i>drift</i> 4.0%)	96
Gambar 4.22	Kurva histeresis spesimen L15SB	98
Gambar 4.23	Kerusakan pada spesimen kolom L15SB di berbagai peningkatan <i>drift</i>	99
Gambar 4.24	Kerusakan pada spesimen kolom L15SB (tampak belakang) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	100

Gambar 4.25	Tampak spesimen kolom L15SB pada akhir pengujian (<i>drift</i> 6.50%).....	101
Gambar 4.26	(a) Tampak perspektif kanan kolom L15SB, terjadi <i>spalling</i> hingga tulangan longitudinal terlihat, (b) Tampak perspektif kiri kolom L15SB	102
Gambar 4.27	Kurva histeresis spesimen L15SM	104
Gambar 4.28	Kerusakan pada spesimen kolom L15SM di berbagai peningkatan <i>drift</i>	105
Gambar 4.29	Kerusakan pada spesimen kolom L15SM (tampak belakang) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	106
Gambar 4.30	Kerusakan pada spesimen kolom L15SM (tampak depan). Daerah inelastis menjauh dari dasar kolom akibat adanya <i>lap splice</i> di luar daerah kritis.....	107
Gambar 4.31	Tampak spesimen kolom L15SM pada akhir pengujian (<i>drift</i> 6.5%)	108
Gambar 4.32	Kurva histeresis spesimen M15SB(2).....	110
Gambar 4.33	Kerusakan pada spesimen kolom M15SB(2) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	111
Gambar 4.34	Kerusakan pada spesimen kolom M15SB(2) (tampak belakang) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	112
Gambar 4.35	Tampak spesimen kolom M15SB(2) pada akhir pengujian (<i>drift</i> 3.5%).....	113
Gambar 4.36	Kerusakan pada spesimen kolom M15SB(1) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	115
Gambar 4.37	Tampak spesimen kolom M15SB(1) pada akhir pengujian (<i>drift</i> 5.5%).....	116
Gambar 4.38	Kurva histeresis spesimen M15SM(2).....	118
Gambar 4.39	Kerusakan pada spesimen kolom M15SM(2) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	119
Gambar 4.40	Kerusakan pada spesimen kolom M15SM(2) (tampak belakang) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	120

Gambar 4.41	Tampak spesimen kolom M15SM(2) pada akhir pengujian (<i>drift</i> 4.5%)	121
Gambar 4.42	Kerusakan pada spesimen kolom M15SM(1) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	123
Gambar 4.43	Kerusakan pada spesimen kolom M15SM(1) di berbagai peningkatan <i>drift</i>	124
Gambar 4.44	Tampak spesimen kolom M15SM(1) pada akhir pengujian (<i>drift</i> 5.0%)	125
Gambar 4.45	Perbandingan perpindahan penetrasi leleh analitis dan eksperimental pada spesimen dengan variabel jarak sengkang .	132
Gambar 4.46	Perbandingan perpindahan penetrasi leleh analitis dan eksperimental pada spesimen dengan variabel sambungan lewatan (<i>lap splice</i>).....	133
Gambar 4.47	Komponen perpindahan lentur, geser dan penetrasi leleh pada spesimen dengan variabel jarak sengkang	136
Gambar 4.48	Komponen perpindahan lentur, geser dan penetrasi leleh pada spesimen dengan variabel sambungan lewatan.....	137
Gambar 4.49	Kontribusi konponen perpindahan lateral terhadap perpindahan lateral total pada spesimen dengan variabel jarak sengkang	138
Gambar 4.50	Kontribusi konponen perpindahan lateral terhadap perpindahan lateral total pada spesimen dengan dengan variabel sambungan lewatan	139
Gambar 4.51	Distribusi kurvatur di sepanjang tinggi kolom pada spesimen dengan tulangan menerus	140
Gambar 4.52	Distribusi kurvatur di sepanjang tinggi kolom pada spesimen dengan tulangan yang disambung (<i>spliced</i>)	141
Gambar 4.53	Perbandingan kurvatur spesimen pada kondisi beban puncak ...	142
Gambar 4.54	Perbandingan kurvatur spesimen pada kondisi kegagalan lateral	142
Gambar 4.55	Kurva <i>drift</i> -beban lateral untuk spesimen dengan variabel jarak sengkang.....	146

Gambar 4.56	Kurva <i>drift</i> -beban lateral untuk spesimen dengan variabel sambungan lewatan tulang longitudinal.....	147
Gambar 4.57	Model backbone load-drift curve.....	151
Gambar 4.58	Model simplified bilinear curve.....	152
Gambar 4.59	Perbandingan kurva backbone, kurva bilinear dan kurva eksperimental.....	159
Gambar 4.60	Perbandingan antara hasil model teoritis metode kurva <i>backbone</i> dan eksperimental saat kondisi ultimit dan kondisi kegagalan lateral	160
Gambar 4.61	Perbandingan antara hasil model teoritis metode kurva <i>bilinear</i> dan eksperimental saat kondisi ultimit	160

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Desain Benda Uji Kolom	53
Tabel 3.2	Detail Variabel Tulangan Transversal.....	56
Tabel 3.3	Detail Variabel Sambungan Lewatan Tulangan Longitudinal	57
Tabel 3.4	Properti Spesimen Kolom	58
Tabel 3.5	Beban aksial, kapasitas momen, kapasitas lateral dan kapasitas geser tiap spesimen.....	68
Tabel 4.1	Hasil uji tekan silinder beton.....	72
Tabel 4.2	Hasil uji hammer spesimen kolom dengan variabel jarak sengkang	72
Tabel 4.3	Hasil uji <i>hammer</i> spesimen kolom dengan variabel <i>lap splice</i>	73
Tabel 4.4	Parameter material tulangan longitudinal	74
Tabel 4.5	Kapasitas dan <i>drift</i> spesimen L15C.....	80
Tabel 4.6	Kapasitas dan <i>drift</i> spesimen L25C.....	84
Tabel 4.7	Kapasitas dan <i>drift</i> spesimen M15C.....	89
Tabel 4.8	Kapasitas dan drift spesimen M25C.....	93
Tabel 4.9	Kapasitas dan <i>drift</i> spesimen L15SB	98
Tabel 4.10	Kapasitas dan <i>drift</i> spesimen L15SM.....	104
Tabel 4.11	Kapasitas dan <i>drift</i> spesimen M15SB(2).....	110
Tabel 4.12	Kapasitas dan <i>drift</i> spesimen M15SM(2).....	118
Tabel 4.13	Komponen <i>drift</i> (%) spesimen saat beban lateral puncak	128
Tabel 4.14	Rasio <i>drift</i> lateral total dengan komponen <i>drift</i> saat kondisi beban lateral puncak	128
Tabel 4.15	Komponen <i>drift</i> geser saat kondisi kegagalan lateral.....	129
Tabel 4.16	Kapasitas kurvatur di penampang kritis, kondisi beban puncak (ultimit).....	129
Tabel 4.17	Perbandingan antara kapasitas lentur eksperimen dan teoritis...	145
Tabel 4.18	Degradasi kekuatan lateral spesimen kolom di tiap peningkatan <i>drift</i>	146
Tabel 4.19	Nilai rasio daktilitas spesimen kolom pada kondisi beban puncak	150

Tabel 4.20	Nilai rasio daktilitas spesimen kolom pada kondisi kegagalan lateral	150
Tabel 4.21	Parameter spesimen kolom yang digunakan dalam studi kasus	154

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kolom merupakan bagian penting bangunan karena kolom bertindak sebagai penopang vertikal bangunan yang menahan seluruh beban bangunan. Kerusakan kolom dapat berakibat keruntuhan total satu lantai bangunan atau bahkan keseluruhan bangunan. Performa kolom menjadi semakin krusial saat terjadi gempa, dimana kolom harus menahan beban lateral yang besar. Bangunan yang terkena beban gempa akan memiliki performa yang baik bila kolom dipastikan dapat menyediakan kapasitas deformasi inelastis yang cukup dalam menahan beban lateral yang besar tanpa terjadi kegagalan yang berarti.

Kolom beton bertulang harus didesain sehingga dapat menyediakan kapasitas lateral (*lateral load carrying capacity*) dan kapasitas simpangan yang cukup untuk performa gempa yang baik. Namun ada kalanya bangunan-bangunan pada daerah rawan gempa, khususnya pada negara berkembang, didesain dan dikonstruksi tanpa memperhatikan kebutuhan akan kapasitas simpangan untuk menahan beban gempa. Kolom pada bangunan-bangunan tersebut umumnya memiliki karakteristik yaitu rasio tulangan longitudinal rendah disertai dengan rasio tulangan transversal yang juga rendah sehingga memiliki efek kekangan yang minim pada kolom. Dampak yang terjadi, bangunan akan memiliki performa yang buruk dan cenderung runtuh secara getas ketika bangunan terkena beban gempa. Kolom yang demikian disebut kolom bertulangan ringan (*lightly reinforced concrete column*).

Bangunan dengan kolom bertulangan ringan paling banyak dijumpai pada bangunan-bangunan eksisting yang berdiri sebelum sebelum dikeluarkannya peraturan mengenai bangunan tahan gempa. Bangunan demikian dirancang terutama untuk menahan beban gravitasi, dan hanya sedikit atau tidak sama sekali memperhatikan beban lateral. Dengan demikian, struktur bangunan tidak dapat mengakomodasi aspek penting dalam desain seismik, seperti daktilitas komponen struktur, mekanisme keruntuhan, dan lain sebagainya. Kasus lain adalah saat bangunan didesain dengan kolom yang besar hanya akibat tuntutan arsitektural,

kolom seperti ini cenderung memiliki rasio tulangan longitudinal yang rendah karena mayoritas beban gravitasi telah dapat ditahan oleh komponen beton. Kolom bertulangan ringan juga masih dapat ditemui pada bangunan-bangunan tempat tinggal pada daerah potensi gempa kecil hingga menengah, dimana pemilik bangunan cenderung tidak memperhatikan kebutuhan akan detail komponen kolom yang daktil.

Penelitian pendahuluan yang dilakukan Wibowo dkk. (2010) menunjukkan gambaran perilaku kolom beton bertulangan ringan di bawah beban aksial konstan dan beban lateral siklik. Spesimen kolom didesain dominan terhadap lentur dengan variasi rasio tulangan longitudinal 0,5% dan 1,0% serta rasio tulangan transversal 0,07%. Meskipun memiliki desain non-daktil, spesimen kolom terbukti mampu mempertahankan kapasitas gesernya hingga kapasitas puncak kolom tercapai, menunjukkan kegagalan geser sebelum lelehnya tulangan longitudinal dapat dihindari. Keruntuhan kolom yang ditandai dengan hilangnya kapasitas aksial kolom beton bertulang tidak selalu terjadi secara tiba-tiba setelah hilangnya kapasitas geser kolom. Pada taraf beban aksial rendah ($0.2A_g f'_c$), kolom masih mampu menahan beban aksial hingga mencapai perpindahan (*displacement*) yang cukup besar sebelum akhirnya runtuh.

Salah satu karakteristik kolom beton bertulangan ringan adalah minimnya kekangan yang diberikan oleh sengkang akibat rasio volume tulangan transversal hanya berada di rentang 0,1% (Wibowo dkk., 2010). Padahal seperti telah diketahui bahwa tingkat rasio tulangan transversal berhubungan erat dengan daktilitas kolom, salah satu parameter yang sangat penting dalam evaluasi gempa berdasarkan performa (*performance-based seismic evaluation*). Dengan meningkatkan rasio tulangan transversal hingga tercapai kapasitas geser kolom yang lebih besar dari dua kali lipat beban geser saat titik leleh, kegagalan getas akibat geser dapat dihindari dan kolom akan gagal akibat lentur dengan daktilitas tinggi (An & Maekawa, 1998). Tulangan transversal juga memiliki peranan penting untuk mencegah tekuk pada tulangan longitudinal. Ketika kolom bersengkang (*tied column*) dibebani hingga gagal, selimut beton akan pecah. Bila sengkang pada kolom memiliki jarak yang cukup renggang, tulangan longitudinal akan tertekuk hampir seketika saat selimut beton yang menumpu sengkang tersebut hilang.

Kegagalan tersebut terjadi seketika dan sering terjadi pada struktur di bawah beban gempa (McCormac & Brown, 2010). Kegagalan getas tersebut sangat berbahaya, terlebih mengingat kolom bertulangan ringan memiliki detail tulangan transversal yang tidak daktil.

Salah satu dampak langsung dari digunakannya detail kolom yang menitikberatkan pada beban gravitasi adalah desain sambungan lewatan pada kolom yang hanya memungkinkan transfer gaya tekan dibandingkan dengan gaya tarik. Kolom memiliki sambungan lewatan yang relatif pendek dan cenderung tidak dikekang dengan baik oleh tulangan transversal. Penerapan tipikal dalam penempatan sambungan lewatan adalah tepat di atas balok atau lantai (daerah ujung kolom), sehingga seluruh panjang sambungan berada di dalam daerah kritis, atau tepatnya pada daerah sendi plastis. Saat terjadi gempa, momen lentur yang cukup besar akan terjadi pada ujung-ujung kolom. Akibatnya, kegagalan sambungan lewatan dapat terjadi pada tingkat beban yang lebih kecil daripada kapasitas leleh atau nominal dari kolom, secara signifikan mengurangi kekuatan, kekakuan dan daktilitas pada kolom selama gempa.

Wibowo dkk. (2010) telah meneliti mengenai pengaruh rasio tulangan longitudinal dan rasio beban aksial terhadap perilaku kolom beton bertulangan ringan. Merujuk pada hasil penelitian tersebut, dalam studi ini akan dievaluasi performa kolom beton bertulangan ringan dengan memperhatikan efek dari jarak tulangan transversal serta dampak dari digunakannya sambungan lewatan yang pendek dan tidak terkekang (*unconfined*). Kedua parameter tersebut disinyalir dapat menjadi penyebab utama kegagalan pada kolom beton bertulangan ringan.

Evaluasi respon bangunan membutuhkan model reliabel yang mampu memprediksi respon aktual dari bangunan tersebut, terutama ketika menghadapi resiko beban gempa yang besar. Hal ini sangat penting, mengingat praktisi bangunan saat ini semakin mengarah pada penggunaan desain berdasarkan performa (*performance-based design*) sebagai alat analisa dan desain. Wibowo dkk. (2010) telah mengembangkan model analitis untuk memprediksi hubungan antara beban lateral dan *drift* pada kolom beton bertulangan ringan. Termasuk di dalamnya adalah model untuk memprediksi *drift* kegagalan lateral (80% beban puncak) dan *drift* kegagalan aksial. Model analitis dikembangkan dengan

memperhitungkan tiga desain parameter pada beton bertulangan ringan, yaitu rasio beban aksial, rasio tulangan longitudinal dan rasio tulangan transversal. Adanya sambungan lewatan yang tidak memadai (*insufficient lap splice*) pada kolom beton bertulangan ringan mengubah performa dan perilaku dari kolom tersebut, bahkan dapat menjadi salah satu penyebab kegagalan kolom. Berdasarkan hal tersebut evaluasi tingkat keakuratan model kurva beban lateral dan *drift* terhadap kurva hasil eksperimental dengan adanya sambungan lewatan turut menjadi salah satu pembahasan dalam studi ini.

1.2 Identifikasi Masalah

Kolom sebagai penopang vertikal bangunan diharapkan memiliki kapasitas lateral dan kapasitas deformasi inelastis yang cukup sehingga bangunan dapat memiliki performa yang baik di bawah beban gempa. Kolom beton bertulangan ringan memiliki karakteristik rasio tulangan longitudinal rendah serta tulangan transversal yang tidak memadai, memberikan efek kekangan yang minim terhadap kolom. Kolom non-daktail tersebut masih banyak dijumpai pada bangunan-bangunan yang didesain dan dikonstruksi tanpa memperhatikan kebutuhan akan kapasitas deformasi inelastis untuk menahan beban gempa, berdampak pada kapasitas *drift* rendah dan kecenderungan bangunan untuk runtuh secara getas di bawah beban gempa.

Namun, penelitian pendahuluan oleh Wibowo dkk. (2010) menunjukkan bahwa sebenarnya kolom beton bertulangan ringan memiliki kapasitas *drift* lebih panjang daripada yang diprediksi selama ini, memberikan kolom beton bertulangan ringan ketahanan terhadap beban gempa. Dalam studi ini akan dievaluasi performa kolom beton bertulangan ringan dengan memperhatikan efek dari jarak tulangan transversal serta dampak dari digunakannya sambungan lewatan yang tidak memadai (*insufficient*). Kedua parameter tersebut disinyalir dapat menjadi penyebab utama kegagalan pada kolom beton bertulangan ringan.

Perilaku beban-*drift* kolom beton bertulangan ringan di bawah beban aksial konstan dan beban lateral siklik dapat diprediksi menggunakan model yang telah dikembangkan oleh Wibowo dkk. (2010). Namun, masih belum diketahui apakah model masih bersifat reliabel saat ditambahkan parameter yang tidak

diperhitungkan sebelumnya, yaitu sambungan lewatan tulangan longitudinal. Berdasarkan hal tersebut evaluasi tingkat keakuratan model kurva beban lateral dan *drift* terhadap kurva hasil eksperimental dengan adanya sambungan lewatan turut menjadi salah satu pembahasan dalam studi ini.

1.3 Rumusan Masalah

Dengan mengacu pada latar belakang dan identifikasi masalah maka rumusan masalah yang akan dibahas adalah:

1. Bagaimana pengaruh parameter rasio tulangan transversal dan sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap mekanisme kegagalan kolom beton bertulangan ringan?
2. Bagaimana pengaruh parameter rasio tulangan transversal dan sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap kapasitas *drift* kolom beton bertulangan ringan?
3. Bagaimana pengaruh parameter rasio tulangan transversal dan sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap kapasitas lateral kolom beton bertulangan ringan?
4. Bagaimana pengaruh parameter rasio tulangan transversal dan sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap kontribusi perpindahan lentur, perpindahan geser dan perpindahan penetrasi leleh kolom beton bertulangan ringan terhadap perpindahan lateral total?
5. Bagaimana tingkat keakuratan model analitis yang telah dikembangkan pada penelitian pendahuluan dengan adanya sambungan lewatan tulangan longitudinal?

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari lingkup penelitian yang terlalu luas maka batasan masalah adalah:

1. Pengaruh rangkai dan susut pada beton tidak ditinjau pada penelitian ini.
2. Variasi parameter sambungan lewatan tulangan longitudinal hanya meliputi lokasi sambungan lewatan saja, tidak mencakup mengenai panjang sambungan lewatan.

3. Pengaruh momen sekunder tidak diperhitungkan.
4. Perancangan benda uji serta konfigurasi alat untuk penelitian disesuaikan dengan ketersediaan dan kapasitas peralatan di laboratorium.

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menjawab rumusan masalah, yaitu:

1. Untuk mengetahui pengaruh parameter rasio tulangan transversal dan lokasi sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap perilaku kolom beton bertulangan ringan secara keseluruhan.
2. Untuk mengetahui kapasitas *drift* dan kapasitas lateral pada kolom beton bertulangan ringan akibat adanya pengaruh dari parameter rasio tulangan transversal dan lokasi sambungan lewatan tulangan longitudinal.
3. Untuk mengetahui pengaruh parameter rasio tulangan transversal dan sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap kontribusi perpindahan lentur, perpindahan geser dan perpindahan penetrasi leleh kolom beton bertulangan ringan terhadap perpindahan lateral total.
4. Untuk mengevaluasi tingkat keakuratan model analitis yang telah dikembangkan sebelumnya dengan adanya sambungan lewatan tulangan longitudinal.

Kemudian diharapkan penelitian ini akan menjawab seberapa jauh kapasitas lateral dan kapasitas *drift* dari kolom beton bertulangan ringan dalam konteks keamanan bangunan dengan kolom beton bertulangan ringan terhadap beban gempa. Dengan demikian akan dapat dilakukan tindakan lanjutan, misalnya melakukan rehabilitasi seismik pada bangunan eksisting dengan kolom beton bertulangan ringan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

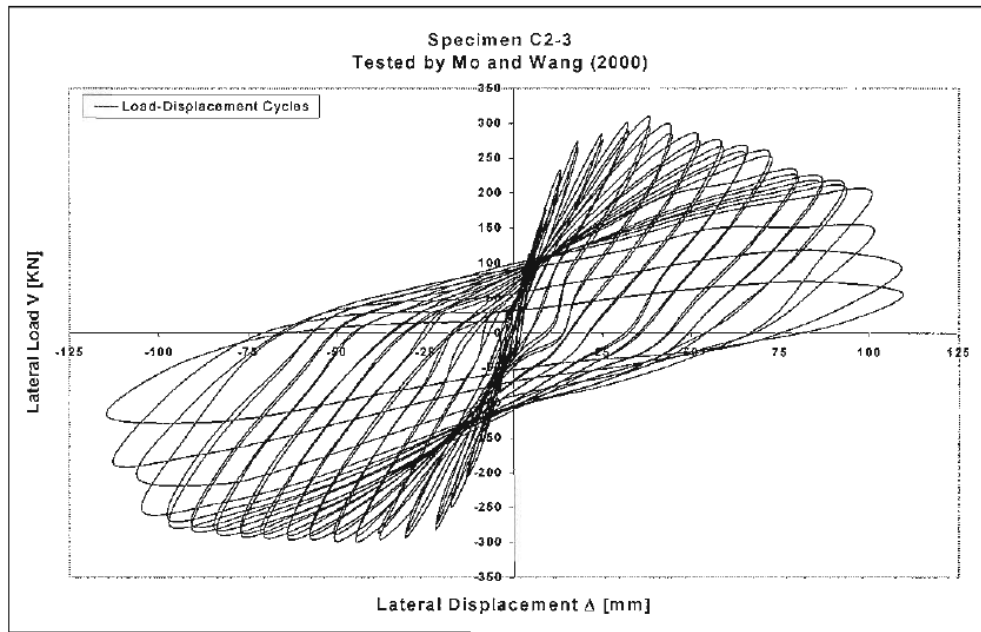
2.1 Kapasitas Drift

2.1.1 Kapasitas Drift Ultimit (Ultimate Drift Capacity)

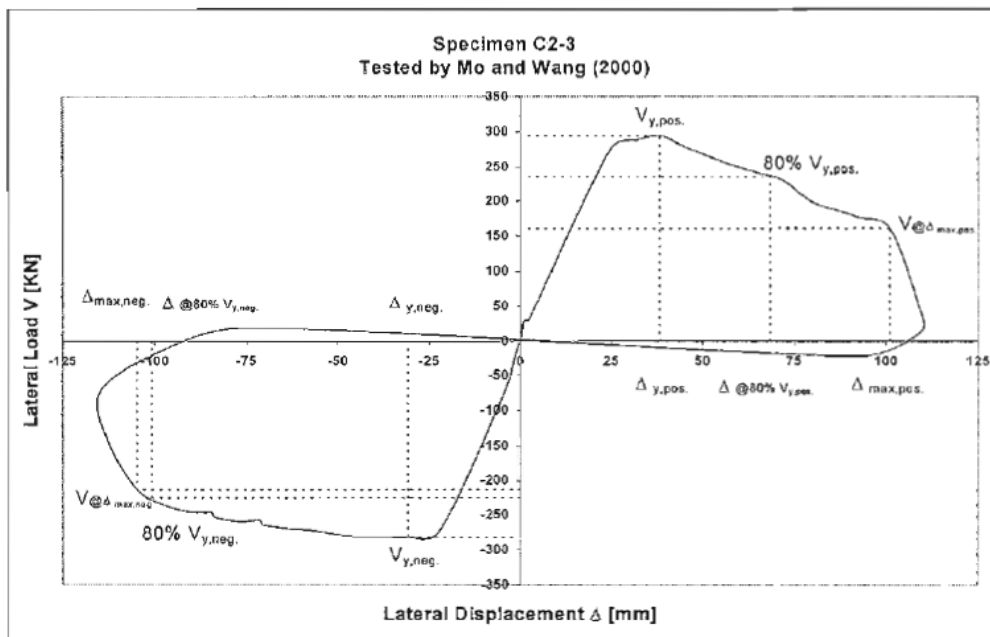
Secara umum, *drift* komponen struktur didefinisikan sebagai rasio antara defleksi komponen struktur dari posisi awal dengan panjang (*length*) komponen struktur tersebut. Maka *drift* ultimit pada kolom dapat dideskripsikan dengan rasio antara defleksi maksimum pada bagian atas atau bawah suatu kolom dengan tinggi kolom. Istilah kapasitas *drift* ultimit menyatakan kondisi kolom dimana kolom masih mampu mempertahankan kapasitas aksial (*vertical load carrying capacity*) bahkan setelah spesimen kolom mencapai *drift* maksimum pada fase inelastis.

Untuk menentukan defleksi maksimum pada spesimen kolom, perlu diperhatikan respon beban-defleksi dari kolom beton bertulang dibawah beban siklik. Grafik hysteresis antara beban dan perpindahan dari penelitian oleh Mo dan Wang (2000) serta Flores (2004) dijadikan sebagai dasar penentuan nilai defleksi maksimum. Hasil penelitian spesimen kolom oleh Mo dan Wang (2000) dapat dilihat pada gambar 2.1. Pada tahap awal penelitian, beban lateral terus naik hingga kolom mengalami leleh. Setelah titik leleh, beban lateral menurun secara bertahap sedangkan perpindahan kolom terus meningkat hingga mencapai defleksi maksimum (Δ_{max}). Saat kolom mencapai defleksi maksimum Δ_{max} , kekuatan kolom menurun secara drastis.

Gambar 2.2 menunjukkan *contour line* dari nilai maksimum grafik hysteresis beban-perpindahan (*displacement*). Nilai perpindahan maksimum spesimen kolom beton bertulang yaitu perpindahan saat kekuatan geser maksimum spesimen turun hingga 80%, yang didapat dari respon beban-perpindahan (gambar 2.2). Merupakan hal yang cukup sulit untuk mengidentifikasi penurunan kekuatan geser pada kolom, sehingga asumsi perpindahan maksimum saat 80% kekuatan geser maksimum dapat digunakan dan terbukti memiliki hasil yang konservatif (Brachmann dkk., 2002).

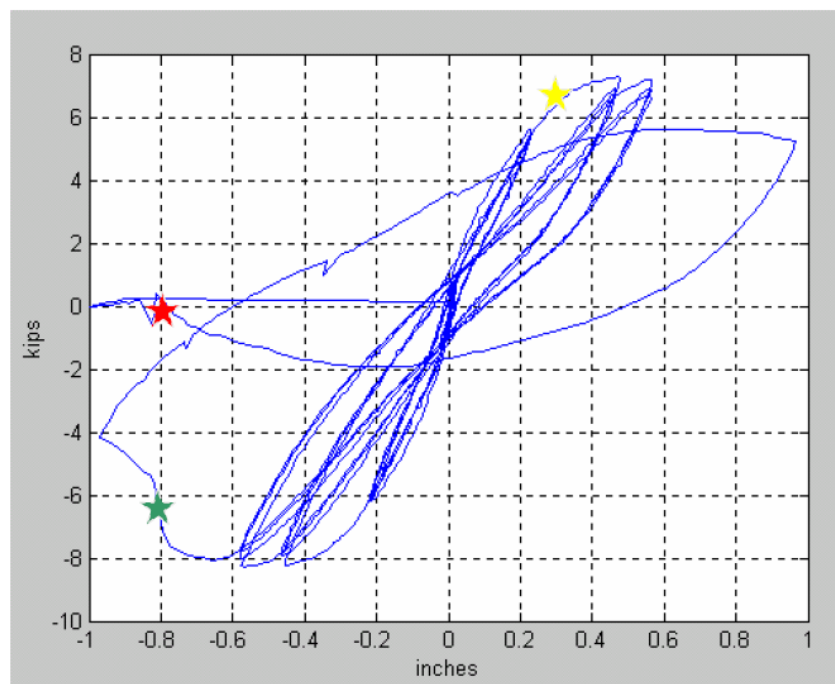


Gambar 2.1 Respon beban lateral-perpindahan dari spesimen kolom
(Mo dan Wang, 2000)



Gambar 2.2 Penentuan perpindahan ultimit dari spesimen kolom
(Mo dan Wang, 2000)

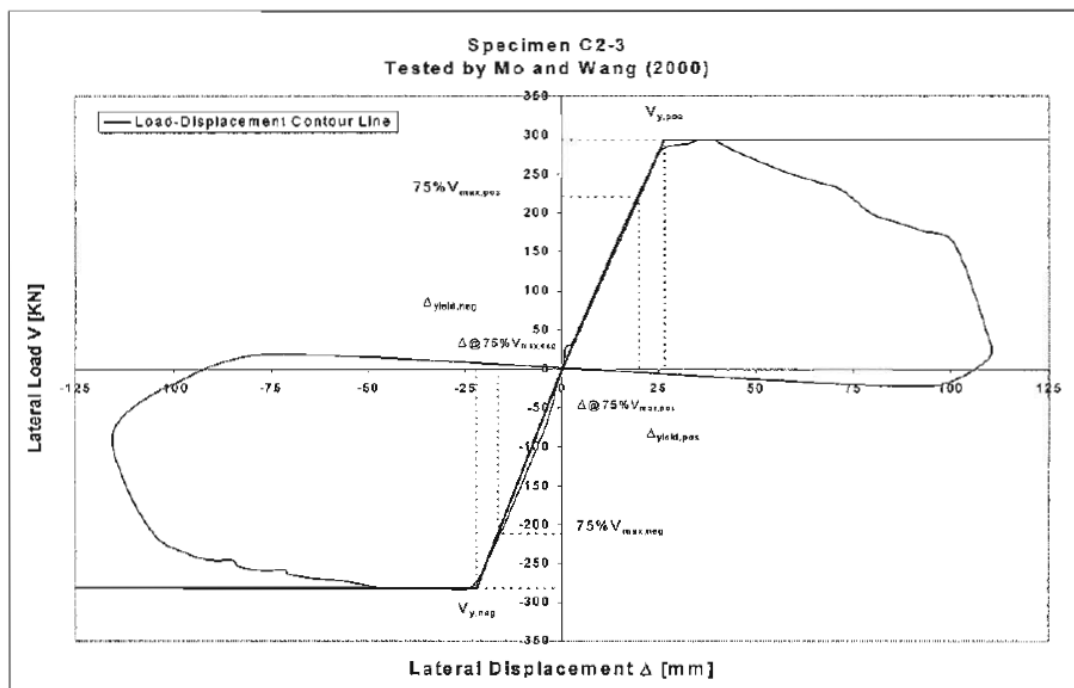
Pendekatan yang hampir sama digunakan oleh Flores (2004). Simpangan maksimum pada spesimen kolom memiliki dua definisi, yaitu simpangan maksimum saat kegagalan geser dan saat kegagalan aksial. Simpangan saat kegagalan geser yaitu simpangan dimana terdapat penurunan sebesar 20% dari beban yang ditahan oleh spesimen kolom. Sedangkan simpangan saat kegagalan aksial merupakan simpangan saat kapasitas geser kolom benar-benar hilang, pada kurva histeresis yaitu titik dimana beban lateral sebesar nol ditahan oleh kolom. Hasil penelitian spesimen kolom beton bertulang oleh Flores (2004) terlihat pada gambar 2.3. Titik berwarna hijau menunjukkan kegagalan geser pada kolom, sedangkan titik merah menunjukkan kegagalan aksial.



Gambar 2.3 Kegagalan geser dan kegagalan aksial spesimen kolom
(Flores, 2004)

2.1.2 Kapasitas *Drift* Leleh (*Yield Drift Capacity*)

Perpindahan leleh (*yield displacement*) didefinisikan sebagai perpindahan lateral kolom beton bertulang di bawah beban lateral siklik pada titik dimana tulangan longitudinal mengalami leleh. Titik leleh sulit untuk diidentifikasi, maka metode pendekatan umumnya digunakan untuk menentukan perpindahan leleh. Titik leleh pada spesimen kolom ditentukan sebagai titik pertemuan antara perkiraan garis linear kurva beban-perpindahan pada fase elastis dengan garis horizontal saat beban geser maksimum (V_{max}). Kemiringan (*slope*) dari garis linear kurva beban-perpindahan pada fase elastis merupakan rasio antara 75% V_{max} dengan nilai perpindahan yang bersangkutan ($\Delta_{@75\%V_{max}}$). Bila perpindahan leleh telah diketahui, maka rasio *drift* leleh bisa dihitung, yaitu dengan membagi perpindahan leleh dengan tinggi spesimen kolom. Gambar 2.4 menunjukkan penentuan perpindahan lateral leleh spesimen kolom dari penelitian oleh Mo dan Wang (2000).



Gambar 2.4 Penentuan perpindahan leleh dari spesimen kolom

(Mo dan Wang, 2000)

2.2 Kapasitas Lentur, Geser dan Aksial Kolom

Spesimen kolom dalam studi ini merupakan kolom yang didesain dominan terhadap lentur, dalam artian dipastikan kegagalan geser tidak terjadi sebelum lelehnya tulangan longitudinal. Untuk mencapai tujuan tersebut, kapasitas geser, kebutuhan geser dan kapasitas lentur spesimen kolom perlu diketahui terlebih dahulu. Kemudian, kapasitas aksial kolom dihitung untuk mendesain beban aksial kolom yang bertindak sebagai beban gravitasi.

2.2.1 Kapasitas Lentur

2.2.1.1 Kapasitas Lentur Menggunakan Metode Klasik

Kapasitas lentur atau kapasitas momen kolom beton bertulang dapat dihitung secara konservatif menggunakan prinsip mekanika dasar dan analisa klasik metode keadaan batas (*limit state method*). Pada penampang melintang suatu kolom, kapasitas momen maksimum kolom dihitung dengan menjumlah perkalian antara gaya internal dari tulangan longitudinal dan beton dengan jarak dari pusat gaya tersebut terhadap *centroid* kolom. Persamaan berikut diturunkan dari gambar 2.4 dan digunakan untuk menghitung kapasitas momen maksimum (*ultimate*) kolom beton bertulang, M_{ult} .

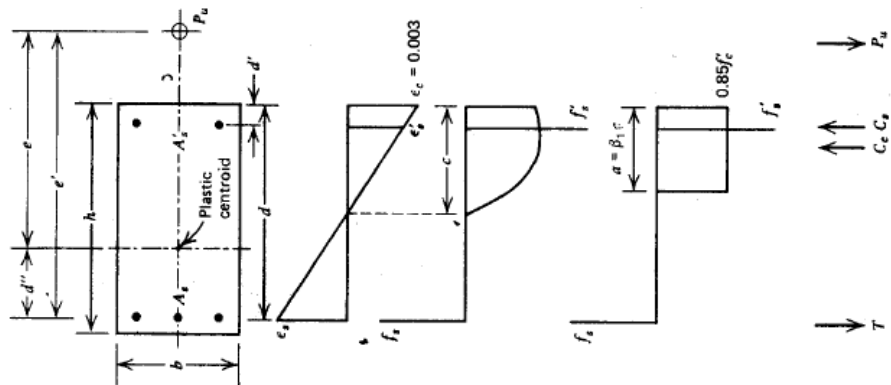
$$M_{ult} = 0,85 f'_c a b (d - d'' - 0,5a) + A_s' f_{yl} (d - d' - d'') + A_s f_{yl} d'' \quad (2.1)$$

Dimana:

A_s' = luas tulangan longitudinal tekan

A_{st} = luas tulangan longitudinal tarik

a = kedalaman blok tegangan tekan



Gambar 2.5 Analisa penampang melintang untuk menghitung kapasitas momen maksimum

2.2.1.2 Kapasitas Lentur Menggunakan Analisa Momen-kurvatur

Hubungan momen dan kurvatur dibutuhkan untuk mengetahui kapasitas momen kolom beton bertulang setelah melewati fase leleh, dalam artian respon inelastis kolom beton bertulang akibat beban aksial dan momen (Flores, 2004). Asumsi yang digunakan untuk menghitung diagram momen kurvatur adalah bidang datar akan tetap datar. Karenanya, regangan pada beton akan setara dengan regangan pada tulangan longitudinal pada kedalaman penampang yang sama dan tegangan pada beton dan baja dapat dihitung dari hubungan tegangan-regangan dari masing-masing material (Wibowo, 2012). Hubungan momen dan kurvatur dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$EI = \frac{M}{\varphi} \quad (2.2)$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_s}{d} \quad (2.3)$$

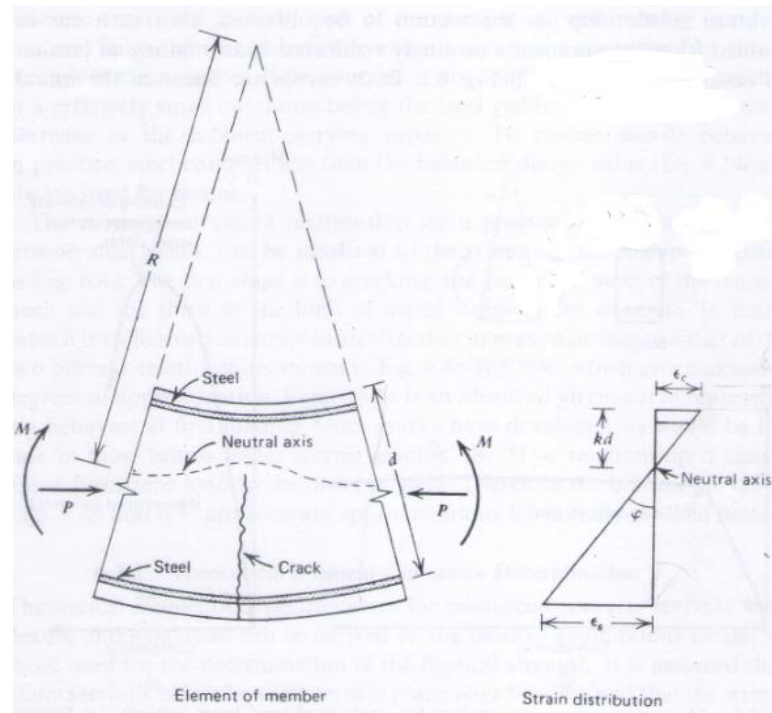
Dimana:

ε_c = regangan beton

ε_s = regangan baja

c = kedalaman garis netral

k = rasio antara kedalaman garis netral dengan tinggi efektif (d)

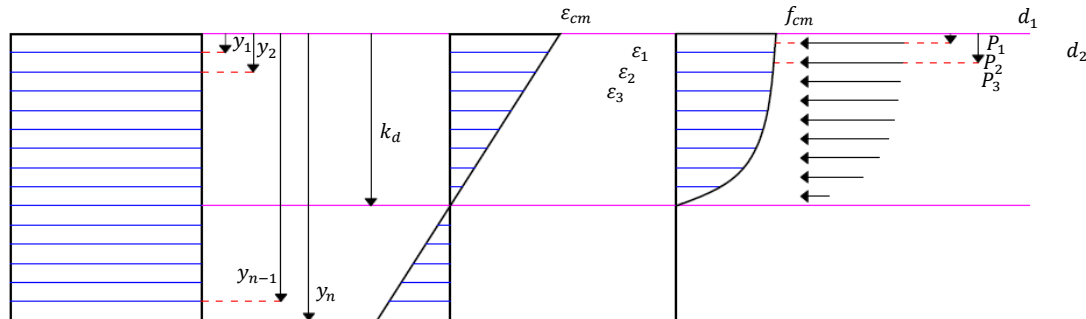


Gambar 2.6 Deformasi suatu komponen lentur

Penentuan hubungan momen kurvatur suatu penampang kritis menjadi rumit untuk dilakukan saat membicarakan kolom, dimana nilai beban aksial secara langsung menentukan mode keruntuhan kolom. Untuk menentukan kurva momen-kurvatur berdasarkan tingkatan beban aksial yang berbeda, digunakan metode *fibre section* (Park & Paulay, 1975) yang membagi penampang melintang menjadi 'n' layer (gambar 2.7). Tiap-tiap layer berisi selimut beton, inti beton dan tulangan dengan kuantitas yang bisa berbeda di tiap layer-nya. Nilai tegangan beton dan baja di tiap layer pada tiap tingkatan kurvatur ditentukan menggunakan hubungan tegangan-regangan masing-masing material. Tegangan baja dan beton di tiap layer menimbulkan adanya gaya internal terpusat P_i yang bekerja di layer tersebut. Momen penampang kemudian dapat dihitung dengan menjumlah momen akibat gaya terpusat P_i (gaya internal) dan momen akibat gaya aksial (gaya eksternal) yang dihitung terhadap sumbu aksis tertentu.

Hubungan momen-kurvatur teoritis pada suatu tingkatan beban dapat ditentukan dengan meningkatkan nilai regangan beton di serat ekstrim tekan ϵ_{cm} secara gradual. Pada tiap nilai ϵ_{cm} , tinggi sumbu netral k_d ditentukan sedemikian sehingga kesetimbangan gaya antara beton, tulangan dan gaya aksial tercapai.

Momen pada tiap tingkat regangan ε_{cm} dan suatu beban aksial tetap dapat ditentukan kemudian menggunakan metode *fibre section* (Park dan Paulay, 1975).



Gambar 2.7 Analisa fibre section

Wibowo (2012) menjelaskan terdapat beberapa asumsi yang digunakan dalam membangun program untuk metode *fibre section*, yaitu:

1. Kurva tegangan regangan untuk selimut beton diasumsikan memiliki hubungan momen kurvatur yang sama dengan beton tak terkekang hingga regangan tekan ultimat atau regangan *fracture* tercapai, dan diabaikan (dianggap telah terkelupas) pada regangan yang lebih tinggi.
2. Untuk simplifikasi, tulangan longitudinal tekan dianggap tidak tertekuk (*buckling*), sehingga dalam analisis tulangan longitudinal masih tetap memiliki kapasitas tekan saat selimut beton di sekitarnya telah terkelupas (*spalled*).

Metode *fibre section* secara ringkas memiliki langkah pengerjaan sebagai berikut (Wibowo, 2012):

1. Tentukan peningkatan (*increment*) regangan beton serat ekstrim tekan ε_{cm}
2. Berikan prediksi awal panjang garis netral k_d
3. Hitung gaya beton dan tulangan baja.
 - a. Bagi penampang melintang menjadi 'n' layer horizontal.
 - b. Untuk tiap tinggi layer y_i , hitung regangan yang sebanding dengan regangan ε_{cm}
 - c. Hitung tegangan beton f_{ci} (tiap segmen-*i*) berdasarkan diagram hubungan tegangan regangan modifikasi Kent dan Park.

- d. Hitung gaya beton di tiap layer $P_i = f_{ci}A_{ci}$
- e. Hitung momen terhadap serat ekstrim $M_i = P_i d_i$
- f. Hitung total gaya beton $P_{tot} = \sum_{i=1}^n P_i$
- g. Hitung total momen $M_{tot} = \sum_{i=1}^n M_i$
- h. Gaya total tulangan baja tergantung dari jumlah lapis tulangan serta banyaknya tulangan di tiap lapisan. Untuk tiap lapis tulangan, hitung regangan baja yang sebanding dengan regangan ϵ_{cm}
- i. Hitung tegangan baja f_{si} (di tiap lapis tulangan) berdasarkan diagram tegangan regangan tulangan baja King dkk., 1986.
- j. Hitung total gaya penampang $P_{tot} = \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{i=1}^n f_{si}A_{si}$

4. Cek keseimbangan persamaan:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{i=1}^n f_{si}A_{si}$$

Dimana:

P = beban aksial yang bekerja di penampang

5. Iterasi langkah 1 hingga 4 dengan nilai k_d yang baru hingga persamaan keseimbangan terpenuhi.
6. Hitung momen penampang untuk nilai ϵ_{cm} dan beban aksial P :

$$M = \sum_{i=1}^n M_i + \sum_{i=1}^n f_{si}A_{si}d_{si} - P \frac{h}{2}$$

Dimana:

d_{si} = jarak dari lapisan tulangan ke serat ekstrim

h = tinggi (*depth*) penampang

7. Kurvatur penampang dapat dihitung dengan persamaan berikut, nilai kurvatur ini nantinya akan digunakan untuk menghitung perpindahan lentur teoritis penampang kolom.

$$\varphi = \frac{\epsilon_{cm}}{k_d}$$

2.2.2 Kapasitas Geser

Kekuatan geser kolom secara umum dihitung sebagai jumlah kekuatan geser yang dimiliki oleh beton dengan kekuatan geser yang dimiliki oleh tulangan transversal. Kekuatan geser spesimen kolom diprediksi menggunakan beberapa metode yang akan dijabarkan sebagai berikut.

1. SNI 03-2847 (2002)

Persamaan kekuatan geser dalam SNI 03-2847 adalah untuk tujuan desain kolom, namun bisa juga digunakan untuk memprediksi kekuatan geser yang dimiliki oleh kolom beton bertulang eksisting. Kekuatan geser komponen beton bertulang (V_n) dihitung sebagai jumlah dari kekuatan geser beton (V_c) dan kekuatan geser tulangan transversal (V_{st}).

$$V_n = V_c + V_{st} \quad (2.4)$$

Untuk komponen beton bertulang yang mendapat gaya geser dan pada saat yang sama dibebani dengan gaya tekan aksial, kapasitas geser dari beton ditentukan dari rumus berikut,

$$V_c = \left[1 + \frac{P}{14A_g} \right] \left[\frac{\sqrt{f'_c}}{6} \right] b_w d \quad (2.5)$$

Dimana:

P = beban aksial

b_w = lebar penampang melintang kolom

d = tinggi efektif penampang melintang kolom

A_g = luas bruto penampang kolom

Sedangkan untuk kapasitas geser yang disediakan tulangan transversal dihitung dengan persamaan,

$$V_{st} = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2.6)$$

Dimana:

A_v = luas tulangan transversal

f_{yt} = tegangan leleh tulangan transversal

s = jarak antar tulangan transversal

2. Priestley et al. (1994)

Priestley et. al (1994) mengusulkan untuk menghitung kekuatan geser kolom beton bertulang dengan beban lateral siklik sebagai jumlah dari kapasitas geser beton V_c , mekanisme *truss* (kapasitas geser tulangan transversal) V_{st} , dan mekanisme busur (*arch mechanism*) yang berhubungan dengan beban aksial V_p . Gambar 2.19 menunjukkan mekanisme *truss* dan mekanisme *arch* yang terbentuk pada kolom beton bertulang akibat beban geser.

$$V_n = V_c + V_{st} + V_p \quad (2.7)$$

Kapasitas geser dari beton ditentukan dari rumus berikut. Pada gambar 2.9 dapat terlihat bahwa kapasitas geser yang disumbang beton semakin tereduksi seiring meningkatnya daktilitas perpindahan.

$$V_c = k \sqrt{f'_c} A_e \quad (2.8)$$

Dimana:

A_e = $0.80 A_g$

k = koefisien yang tergantung dari tingkat daktilitas perpindahan komponen struktur (gambar 2.9)

Kontribusi tulangan transversal terhadap kekuatan geser didasarkan pada mekanisme *truss* dimana sudut antara *diagonal compression strut* dengan sumbu longitudinal kolom adalah sebesar 30° . Untuk kolom dengan penampang segiempat, mekanisme *truss* V_{st} diberikan sebagai,

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} D'}{s} \cot 30^\circ \quad (2.9)$$

Dimana:

D' = jarak as ke as sengkang yang paralel dengan gaya geser yang bekerja (gambar 2.10)

Kontribusi mekanisme busur (*arch mechanism*) terhadap kekuatan geser diberikan sebagai,

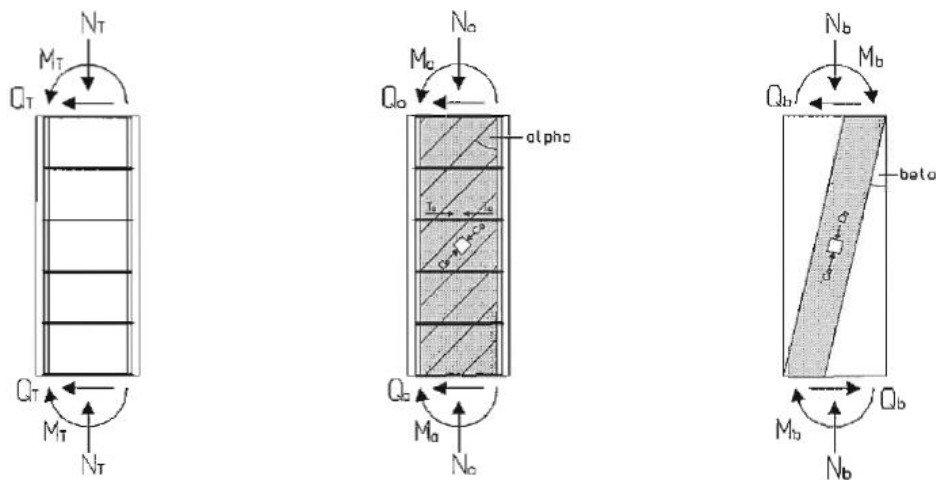
$$V_p = P \tan \alpha = \frac{D - c}{2a} P \quad (2.10)$$

Dimana:

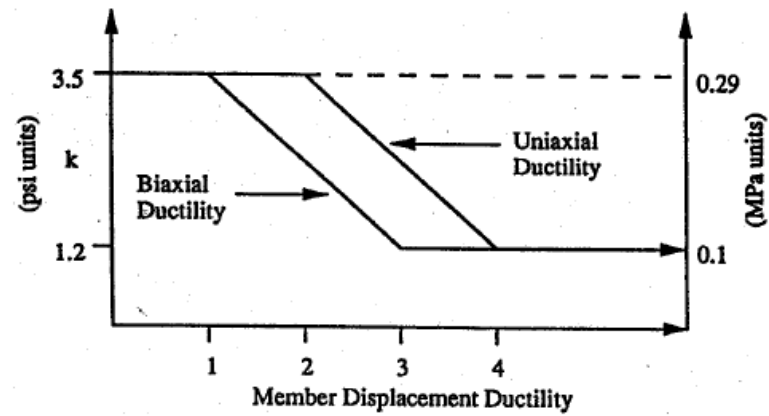
α = kemiringan *diagonal compression strut* (gambar 2.11)

c = tinggi garis netral

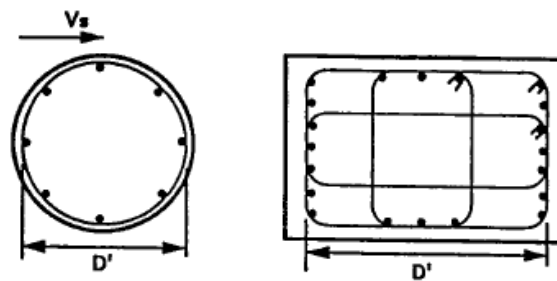
D = tinggi keseluruhan penampang kolom



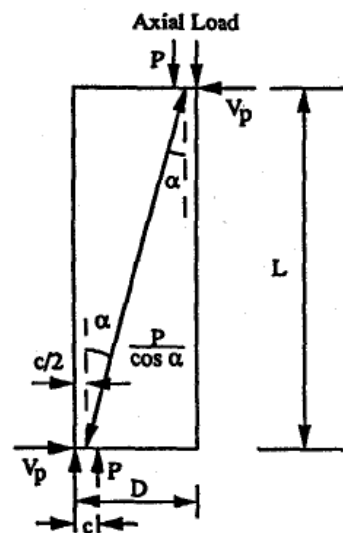
Gambar 2.8 (a). Tampak depan kolom beton bertulang; (b) *Truss mechanism*; (c) *Arch mechanism*



Gambar 2.9 Nilai parameter daktilitas perpindahan k
(Priestley e. al., 1994)



Gambar 2.10 Definisi D' untuk kekuatan geser *truss mechanism*
(Priestley e. al., 1994)



Gambar 2.11 Kontribusi beban aksial terhadap kekuatan geser
(Priestley e. al., 1994)

3. Sezen (2002)

Sezen (2002) mengembangkan model kapasitas geser kolom beton bertulang yang dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu kekuatan kolom, aspek rasio dan kuantitas tulangan transversal. Kapasitas geser kolom beton bertulang (V_n) pada model ini terdiri dari kapasitas geser dari beton V_c dan kapasitas geser dari tulangan transversal V_{st} . Kapasitas geser dipengaruhi oleh daktilitas perpindahan dan digambarkan dalam persamaan kapasitas geser sebagai parameter k (gambar 2.23). Persamaan kapasitas geser oleh Sezen (2002) adalah sebagai berikut.

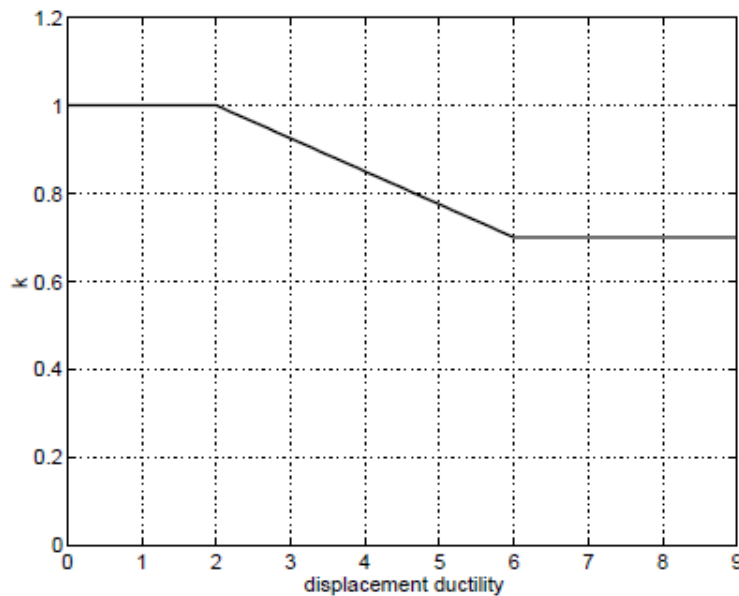
$$V_n = k(V_c + V_{st}) \quad (2.11)$$

$$V_c = \left[\frac{0.5\sqrt{f'_c}}{L/d} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5\sqrt{f'_c}A_g}} \right] 0.80A_g \quad (2.12)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s}$$

Dimana:

L/d = aspek rasio kolom beton bertulang



Gambar 2.12 Nilai parameter daktilitas perpindahan k
(Sezen, 2002)

4. Wibowo (2012)

Wibowo (2012) mengembangkan model kapasitas geser untuk kolom beton bertulangan ringan. Seperti model lainnya, kapasitas geser kolom beton bertulang terdiri dari kapasitas dari beton dan kapasitas dari tulangan transversal. Dari hasil penelitian diketahui bahwa retak pada beton lebih didominasi oleh retak lentur-geser dibandingkan dengan retak geser *web*. Karenanya, pada persamaan kapasitas geser beton digunakan luas retak (A_{cr}) dan bukan luas bruto (A_g).

$$V_n = V_c + V_{st}$$

$$V_c = \frac{2}{3} A_{cr} \sqrt{(f'_t)^2 + \frac{f'_t P}{A_{cr}}} \quad (2.13)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s}$$

$$A_{cr} = 0.85(n_c \rho_v)^{0.36} b d \quad (2.14)$$

Dimana:

A_{cr} = luas retak penampang kolom

f'_t = kekuatan tarik beton

n_c = rasio modulus elastisitas = E_s/E_c

ρ_v = rasio tulangan longitudinal = A_{st}/bd

Nilai kapasitas geser total V_n akan tereduksi seiring peningkatan daktilitas perpindahan. Reduksi kapasitas geser kolom semakin tajam dengan meningkatnya rasio beban aksial atau aspek rasio, atau kombinasi keduanya, menggambarkan perilaku yang lebih getas.

$$V_n = k_\mu (V_c + V_{st}) \quad (2.15)$$

Dimana:

k_μ = faktor degradasi kekuatan geser (persamaan 2.33)

2.2.3 Kapasitas Aksial

Kapasitas aksial kolom beton bertulang tergantung dari kapasitas aksial tulangan longitudinal dan kapasitas aksial beton. Persamaan berikut digunakan untuk menghitung kapasitas maksimum kolom beton bertulang P_n ,

$$P_n = 0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_{yl} A_{st} \quad (2.16)$$

Dimana:

f'_c = kekuatan tekan beton

f_{yl} = tegangan leleh tulangan longitudinal

A_g = luas bruto penampang kolom

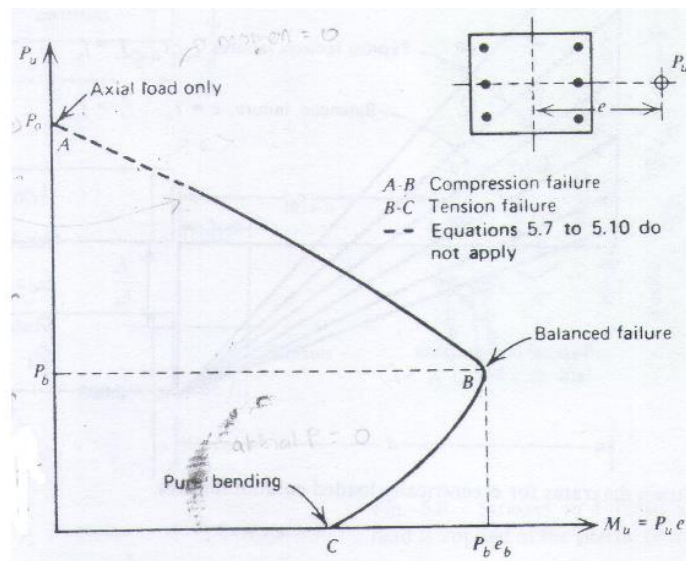
A_{st} = luas total tulangan longitudinal

Persamaan awal, $0,85 f'_c (A_g - A_{st})$ merupakan kapasitas aksial yang dimiliki oleh beton dan persamaan kedua, $f_{yl} A_{st}$ merupakan kapasitas aksial yang dimiliki oleh tulangan longitudinal. Kapasitas aksial kolom maksimum dicapai saat tidak ada momen lentur yang timbul pada kolom.

2.3 Diagram Interaksi Kolom Beton Bertulang

Pada balok beton bertulang, keruntuhan tarik atau tekan tergantung dari apakah tulangan tarik mencapai kekuatan lelehnya, sehingga keruntuhan tekan yang getas dapat dihindari dengan membatasi luas tulangan. Namun, kolom beton bertulang tidak bekerja demikian karena tipe kegagalan justru tergantung dari tingkat beban aksial yang bekerja.

Keruntuhan seimbang (*balanced failure*) terjadi ketika tulangan tarik tepat mencapai kekuatan lelehnya bersamaan dengan regangan serat tekan ekstrim beton mencapai 0,003. Keruntuhan tarik terjadi pada tingkatan beban aksial yang lebih rendah dari beban aksial saat keruntuhan seimbang ($P_u < P_b$). Pada tipe keruntuhan ini, tulangan tarik sudah leleh sebelum serat ekstrim tekan beton mencapai regangan ultimatnya ($\epsilon_{cu} = 0,003$). Keruntuhan tekan yang getas adalah saat $P_u > P_b$, serat tekan ekstrim beton telah mencapai regangan ultimit sebelum tulangan tarik mencapai kekuatan lelehnya.



Gambar 2.13 Diagram interaksi kolom beton bertulang

Terlihat dari gambar 2.13 bahwa kombinasi tertentu dari beban aksial dan momen akan menyebabkan keruntuhan kolom dengan tipe yang berbeda. Dari titik A ke B dari kurva, kapasitas momen penampang meningkat dengan turunnya beban aksial, tetapi hal yang berlawanan terjadi dari titik B ke C dimana kapasitas momen justru semakin menurun. Sebenarnya hal ini masuk akal sebab setiap beban tekan aksial pada daerah tersebut cenderung mengurangi tegangan dalam tulangan tarik yang menyebabkan lebih besar lagi momen yang dapat ditahan (McCormac dan Brown, 2010). Titik seimbang dari diagram interaksi diperkirakan terjadi di titik rasio beban aksial 0,4.

2.4 Pengaruh Parameter Terhadap Perilaku Kolom

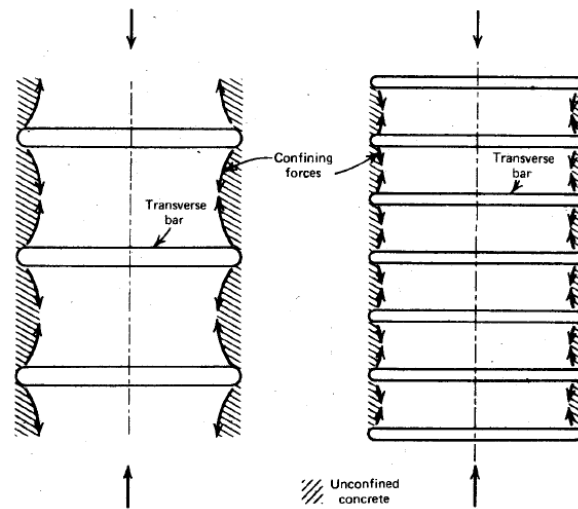
Perilaku kolom beton bertulang, dalam kaitannya dengan kapasitas lateral dan kapasitas *drift* kolom, tergantung dari parameter-parameter desain tertentu. Berikut akan dijelaskan mengenai parameter tersebut serta pengaruhnya terhadap perilaku kolom beton bertulang.

2.4.1 Tulangan Tranversal

Tulangan transversal memiliki pengaruh yang besar terhadap performa daktilitas dari kolom dengan beban lateral siklik. Tulangan transversal dapat memberikan tambahan kapasitas geser dan memberikan kekangan ke kolom. Saat kolom diberikan kombinasi beban aksial dan beban lateral siklik, tegangan pada inti beton meningkat dan beton cenderung untuk mengembang (*expand*). Tulangan transversal memiliki peranan penting pada keadaan tersebut, dimana ia akan mengekang inti beton dan mencegah tertekuknya tulangan longitudinal. Tambahan kekuatan geser yang diberikan oleh tulangan transversal dapat mencegah terjadinya kegagalan geser yang getas. Jumlah rasio tulangan transversal memiliki dampak langsung terhadap kapasitas geser kolom. Dengan meningkatkan jarak antar tulangan transversal, kekuatan geser kolom akan jatuh dan berakibat pada peningkatan deformasi geser dan total deformasi secara keseluruhan.

Kapasitas kekangan yang diberikan tulangan tranveral dapat meningkat dengan memperkecil jarak antara tulangan transversal (*closed-spaced transverse reinforcement*). Parameter ini dapat diekspresikan dalam rasio tulangan transversal, yang memberikan perbandingan antara tulangan transversal yang tersedia dengan inti beton yang harus dikekang. Dengan adanya tambahan kekangan yang diberikan tulangan transversal, tegangan dan regangan kompresi yang lebih tinggi dapat dicapai oleh kolom sebelum kegagalan terjadi (Park dan Paulay, 1975).

Detail seismik harus dapat memastikan komponen struktural memiliki kapasitas untuk menahan aktivitas seismic yang tinggi. Jumlah tulangan transversal yang tinggi menyediakan kekuatan geser yang cukup untuk menahan beban gempa lateral, sedangkan jarang sengkang yang rapat memastikan inti beton tetap terkekang di tingkat displasemen yang tinggi. Pengekangan lateral ini meningkatkan kekuatan geser dan daktilitas beton, point penting yang dibutuhkan untuk performa seismic struktur beton bertulang yang baik. Beton yang terkekang dengan baik dapat tetap utuh dibawah displasemen yang tinggi bahkan ketika beton telah retak akibat tegangan tarik. Pada beton tak terkekang atau beton yang tidak terkekang dengan baik (*poorly confined*), gaya geser yang berulang secara periodik (*cycling*) menyebabkan beton pecah seketika dan kehilangan kekuatan sesaat setelah retak mulai terlihat (Lodhi, 2012).



Gambar 2.14 Pengaruh jarak antar tulangan transversal terhadap efektifitas kekangan

2.4.1.1 Rasio Luas (*Area Ratio*) Tulangan Transversal

Rasio luas tulangan transversal umumnya digunakan untuk mendesain kekuatan geser komponen struktur pada keadaan beban statis. Rasio luas tulangan transversal berhubungan secara langsung dengan tulangan *web* yang dibutuhkan untuk mencegah retak miring akibat geser. Tersedianya tulangan transversal yang memadai akan mencegah kemungkinan terjadi kegagalan geser dan memastikan kapasitas lentur dapat tercapai secara penuh.

Rasio luas tulangan transversal didefinisikan sebagai total luas penampang melintang sengkang dibagi dengan luas penampang kolom yang tegak lurus dengan arah beban.

$$\rho_{area} = \frac{n A_v}{b_s s} \quad (2.17)$$

Dimana:

n = jumlah batang tulangan yang dilewati retak geser

A_v = luas potongan melintang tulangan transversal

b_s = dimensi kolom dihitung dari as ke as sengkang

s = jarak antar Sengkang

2.4.1.2 Rasio Volume (*Volume Ratio*) Tulangan Tranversal

Rasio volume tulangan transversal lebih untuk mendeskripsikan kuantitas kekangan (*confinement*) yang tersedia pada kolom, karena menunjukkan hubungan antara volume total baja tulangan dengan volume beton. Rasio volume tulangan transversal didapat dengan membagi volume tulangan transversal dengan volume inti beton pada sepanjang jarak antar tulangan transversal. Volume inti beton dihitung dari luar sengkang (Park dan Paulay, 1975).

$$\rho_{volume} = \frac{A_v (2b_s + 2h_s)}{b_h h_h s} \quad (2.18)$$

Dimana:

b_s, h_s = dimensi kolom dihitung dari as ke as sengkang

b_h, h_h = dimensi kolom dihitung dari luar sengkang

2.4.2 Tulangan Longitudinal

Banyaknya tulangan longitudinal yang dimiliki oleh kolom biasa diekpresikan dalam rasio tulangan longitudinal, yaitu perbandingan antara luas tulangan longitudinal dengan luas penampang kolom.

$$\rho_v = \frac{A_{st}}{b d} \quad (2.19)$$

Dimana:

A_{st} = luas total tulangan longitudinal

b = lebar penampang kolom

d = panjang efektif (*effective depth*) penampang kolom

Rasio tulangan longitudinal berkaitan dengan kapasitas lentur yang dimiliki oleh kolom. Peningkatan rasio tulangan longitudinal meningkatkan kapasitas lentur kolom, namun peningkatan kapasitas geser tidak signifikan. Rasio tulangan longitudinal mempengaruhi respon lateral kolom. Ketika rasio tulangan tinggi, kemungkinan terbesar adalah tulangan belum leleh ketika kebutuhan kapasitas geser tercapai, atau tulangan leleh tepat sebelum kegagalan geser. Maka rasio

tulangan longitudinal yang tinggi dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kegagalan geser atau kegagalan lentur-geser (Sotoud dan Aboutaha, 2014).

Selanjutnya dalam Park dan Paulay (1975), bentuk kurva tegangan-regangan pada regangan yang tinggi turut dipengaruhi oleh rasio diameter tulangan longitudinal dengan panjang tulangan yang tak terkekang. Rasio tersebut menentukan apakah tulangan longitudinal dapat secara efektif mengekang beton dan tidak mudah tertekuk saat beton mencapai tegangan yang tinggi.

Penelitian oleh Wibowo (2012) mempelajari pengaruh rasio tulangan longitudinal terhadap kapasitas *drift* kolom beton bertulangan ringan saat terjadi kegagalan aksial. Peningkatan rasio tulangan longitudinal dari 0.5% menjadi 1% menyebabkan terjadinya peningkatan beban lateral ultimit kolom, namun kapasitas *drift* kolom saat kegagalan lateral dan aksial menurun, menunjukkan adanya kekakuan yang lebih pada kolom. Kegagalan aksial pada kedua kolom ditandai dengan tertekuknya tulangan longitudinal. Kolom beton bertulangan dengan rasio tulangan longitudinal rendah (*poorly reinforced column*) terbukti tidak langsung gagal pada *drift* yang rendah. Pada taraf beban aksial yang rendah, kolom mampu mempertahankan kapasitas aksial bahkan setelah kapasitas lateralnya telah menurun drastis.

2.4.3 Aspek Rasio (*Shear Span to Depth Ratio*)

Aspek rasio merupakan parameter penting yang mempengaruhi kapasitas *drift* pada kolom dan didefinisikan sebagai rasio antara bentang geser (*shear span*) dengan panjang efektif (*effective depth*) penampang. Pada kolom yang diuji dengan kurvatur tunggal, *shear span* sama dengan tinggi kolom.

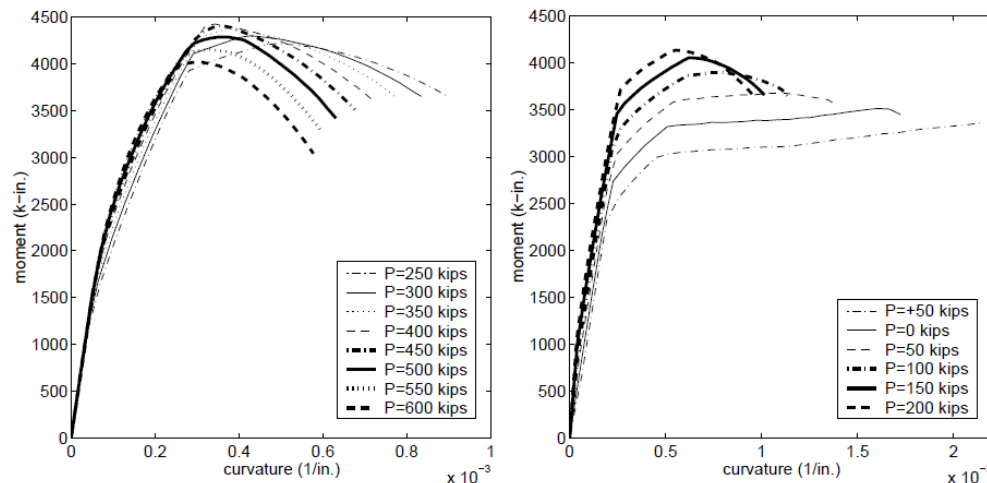
Shear span to depth ratio adalah faktor utama yang mendefinisikan mode kegagalan kolom. Secara umum, mode kegagalan untuk $a/d < 2$ adalah geser, sedangkan kolom dengan $a/d > 2$ kegagalan lentur mendominasi. Untuk kolom dengan $2 < a/d < 4$, kebutuhan kapasitas lentur dan geser relatif sama dan mode kegagalan tidak dapat dipastikan. Mode ini disebut mode kegagalan lentur-geser (Wan H. dkk., 2010). Data eksperimental menunjukkan hanya 63% kolom dengan $a/d < 2$ yang gagal di geser dan hanya 51% kolom dengan $a/d > 4$ yang gagal di lentur. Karenanya, tidak ada batasan yang pasti untuk a/d untuk menspesifikasi

mode kegagalan dan mode kegagalan kolom tidak dapat dipastikan hanya mengandalkan *shear span to depth ratio* saja (Sotoud dan Aboutaha, 2014).

2.4.4 Rasio Beban Aksial

Rasio beban aksial didefinisikan sebagai perbandingan antara beban aksial terhadap kapasitas aksial komponen struktur. Rasio beban aksial secara umum mereduksi kapasitas daktilitas kurvatur akibat peningkatan kedalaman daerah tekan yang menyebabkan peningkatan kurvatur leleh dan menurunnya kurvatur ultimit. Hal ini telah dibuktikan pada penelitian oleh Wibowo (2012) dimana peningkatan beban aksial menyebabkan terjadinya kegagalan aksial spesimen kolom beton bertulang pada *drift* yang lebih rendah, namun kolom mengalami leleh pada *drift* yang lebih tinggi. Hasil penelitian tersebut juga menunjukkan kapasitas beban lateral meningkat seiring peningkatan beban aksial, namun pengaruh tersebut semakin berkurang seiring semakin meningkatnya rasio tulangan longitudinal.

Gambar 2.15 memperlihatkan hubungan momen dan kurvatur pada kolom di bawah beban aksial dengan rentang 600 kips terhadap tekan dan 50 kips terhadap tarik (Sezen, 2002). Pada analisa, di bawah beban aksial yang tinggi (lebih dari atau sama dengan 500 kips), tulangan longitudinal tarik belum mencapai tegangan lelehnya saat momen puncak. Kapasitas momen puncak meningkat seiring meningkatnya beban aksial, namun menurun di taraf beban aksial yang tinggi tersebut, menunjukkan kegagalan kolom dikontrol oleh kegagalan tekan. Dengan meningkatnya beban aksial, kekakuan awal meningkat sedangkan kapasitas kurvatur dan daktilitas kurvatur menurun.



Gambar 2.15 Pengaruh beban aksial terhadap kapasitas kurvatur pada kolom beton bertulang (Sezen, 2002)

2.5 Sambungan Lewatan Tulangan Longitudinal (*Lap Splice*)

Beban gempa menyebabkan terjadinya tegangan balok-balik pada kolom beton bertulang dan berdampak pada kebutuhan sambungan lewatan tulangan longitudinal yang daktail. Penempatan sambungan lewatan tepat di atas pelat lantai umum ditemukan pada struktur bangunan karena mempermudah pekerjaan konstruksi. Padahal ujung kolom (tepat di atas pelat lantai) adalah titik dimana momen maksimum, sehingga pada titik tersebut tulangan longitudinal mengalami tegangan tekan atau tarik maksimum.

Pengamatan yang dilakukan Lodhi (2012) mengindikasikan bahwa panjang sambungan lewatan dan kekangan transversal merupakan faktor penting yang mempengaruhi perilaku sambungan lewatan di bawah beban siklik. Adanya kekangan transversal yang mencukupi di sepanjang sambungan lewatan akan turut mengikat sambungan lewatan sehingga tidak mudah terjadi kegagalan pada sambungan lewatan, atau dengan kata lain performa sambungan lewatan meningkat. Namun, untuk kolom beton bertulang dengan sambungan lewatan yang kurang dikekang (*poorly confined lap splices*) dan terletak dalam daerah zona plastis, dengan menambahkan kekangan transversal pada sambungan lewatan memang meningkatkan performa sambungan lewatan namun respon tersebut tidak akan sama dengan apabila kolom tidak memiliki sambungan lewatan.

Sambungan lewatan yang mentransfer tegangan tarik harus memiliki panjang yang cukup sehingga tulangan longitudinal dapat mencapai kekuatan lelehnya, atau dengan kata lain kegagalan sambungan akibat *slip* dapat dihindari. Panjang minimum sambungan lewatan dalam keadaan tarik menurut SNI 03-2847-2002 adalah,

$$l = 1,3l_d \quad (2.20)$$

$$l_d = \frac{12 f_y \alpha \beta \lambda}{25 \sqrt{f'_c}} d_b > 300mm \quad (2.21)$$

Dimana:

α = faktor lokasi penulangan

β = faktor pelapis tulangan

λ = faktor beton agregat ringan

d_b = diameter tulangan longitudinal

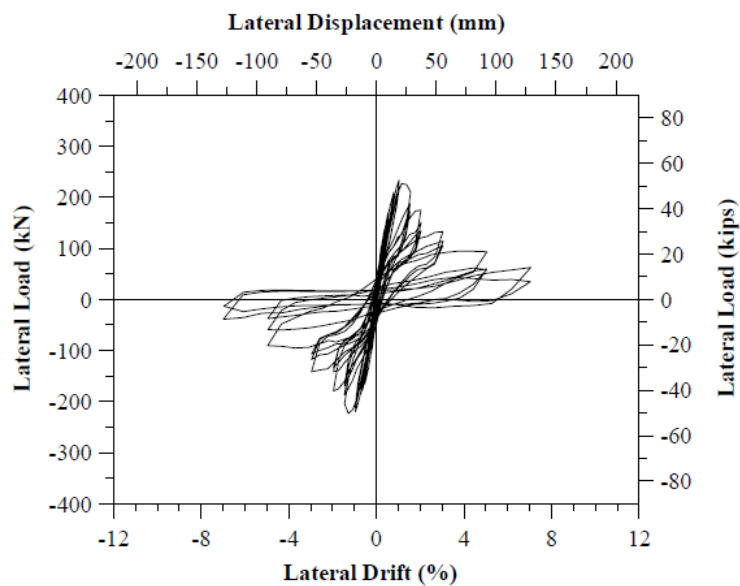
Tidak disebutkan secara eksplisit pada SNI 03-2847-2002 jarak antar tulangan transversal yang diperlukan untuk menjamin performa sambungan lewatan, namun untuk bangunan yang didesain dengan daktilitas tinggi harus dipastikan terdapat sengkang yang mengikat daerah sambungan lewatan dengan jarak tidak kurang dari $d/4$ atau 100 mm. Penempatan sambungan lewatan juga tidak diperbolehkan pada daerah yang kritis, yaitu pada lokasi dimana terdapat kemungkinan terjadinya leleh lentur.

Penelitian mengenai kolom dengan sambungan lewatan pendek dilakukan oleh Melek *et. al.* (2003) serta Bousias *et. al.* (2006). Kolom dengan sambungan lewatan $20 d_b$ diberikan beban aksial dan beban lateral siklik dan dianalisa oleh Melek *et. al.* (2003). Semua spesimen kolom mengalami penurunan kapasitas lateral secara tiba-tiba pada *drift level* antara 1% dan 1.5% yang disebabkan kegagalan sambungan lewatan (Gambar 2.16 dan 2.17). Respon yang terjadi adalah tidak daktil (*non-ductile*), dimana spesimen kolom tidak memiliki daktilitas perpindahan dan kemampuan disipasi energi yang rendah. Penelitian oleh Bousias *et. al.* (2006) menunjukkan, semakin pendek sambungan lewatan kapasitas lateral

kolom semakin berkurang, bahkan tidak mencapai kapasitas momen leleh teoritis dari kolom tanpa sambungan lewatan.



Gambar 2.16 Spesimen kolom S20MI dengan panjang sambungan lewatan $20 d_b$ pada *drift* 3% (Melek et. al., 2003)



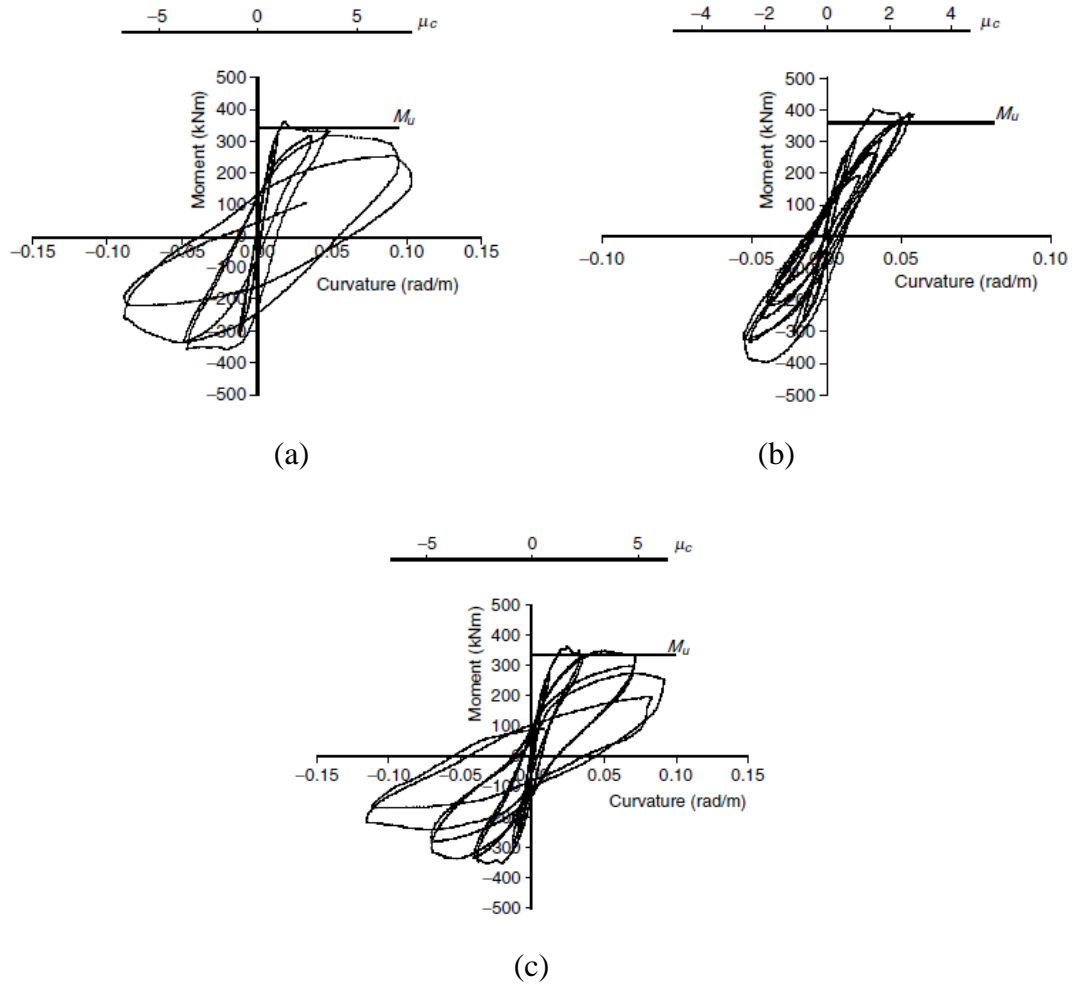
Gambar 2.17 Grafik hysteresis beban lateral-perpindahan spesimen kolom S20MI (Melek et. al., 2003)

Pengaruh letak sambungan lewatan juga mempengaruhi performa kolom. Pam dan Ho (2009) meninjau pengaruh letak sambungan lewatan tulangan longitudinal pada kolom beton bertulang, dimana sambungan lewatan ditempatkan di daerah kritis (sambungan balok-kolom) dan di luar daerah kritis (pada tengah kolom). Spesimen kolom terdiri dari tiga spesimen: spesimen LN yaitu kolom tanpa sambungan lewatan; spesimen LP yaitu kolom dengan sambungan lewatan di ujung kolom; dan spesimen LO yaitu kolom dengan sambungan lewatan di tengah kolom.

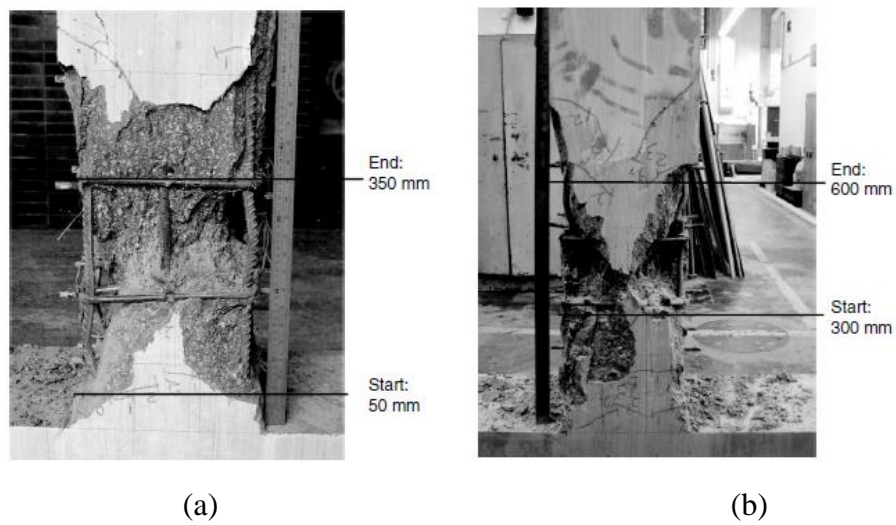
Spesimen kolom LP runtuh dengan daktilitas rendah, sedangkan spesimen kolom LO memiliki performa yang menyerupai spesimen kolom LN. Hasil tersebut adalah logis, karena dalam penelitian tersebut, panjang sambungan tulangan longitudinal dan kekangan tulangan transversal didesain agar memenuhi standar atau kode yang berlaku. Kurva momen-kurvatur spesimen LP turun secara cepat setelah beban mencapai puncak. Selain itu, kurvatur (*curvature*) yang dimiliki spesimen LP pada siklus akhir pembebanan lebih kecil dibandingkan spesimen LN dan LO (Gambar 2.8), menunjukkan daktilitas yang lebih rendah pada spesimen kolom LP.

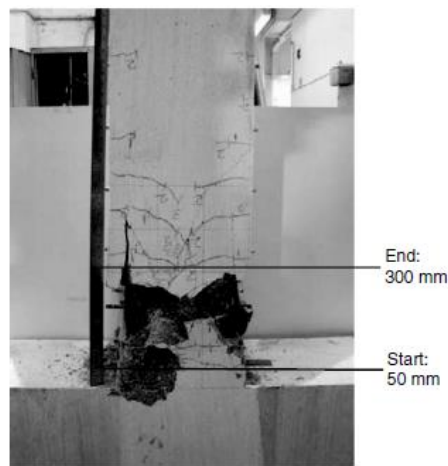
Hasil yang menarik didapat pada pengaruh letak sambungan lewatan terhadap letak dan panjang daerah kritis. Spesimen LN dan LO memiliki daerah kritis di tempat yang sama, yaitu bagian dasar kolom (permukaan kolom yang disambung dengan balok). Daerah kritis pada spesimen LP berubah, yaitu naik menjauhi daerah ujung kolom (gambar 2.19).

Pada studi yang dilakukan oleh Pam dan Ho, pemberian sambungan lewatan dengan panjang memadai di daerah kritis menyebabkan kekakuan di penampang kritis meningkat, dan kapasitas lentur kolom naik 10% lebih tinggi dari kapasitas lentur nominal. Hal ini sebaiknya tidak terjadi karena menyebabkan adanya kebutuhan kekuatan yang tidak diinginkan di area sekitar daerah kritis. Peningkatan kekakuan di daerah kritis akibat adanya sambungan lewatan berujung pada bergesarnya daerah kerusakan kolom menjauhi daerah kritis di dasar kolom.



Gambar 2.18 Grafik hysteresis momen-kurvatur (*curvature*): (a) Spesimen LN; (b) Spesimen LP; (c) Spesimen LO (Pam dan Ho., 2009)





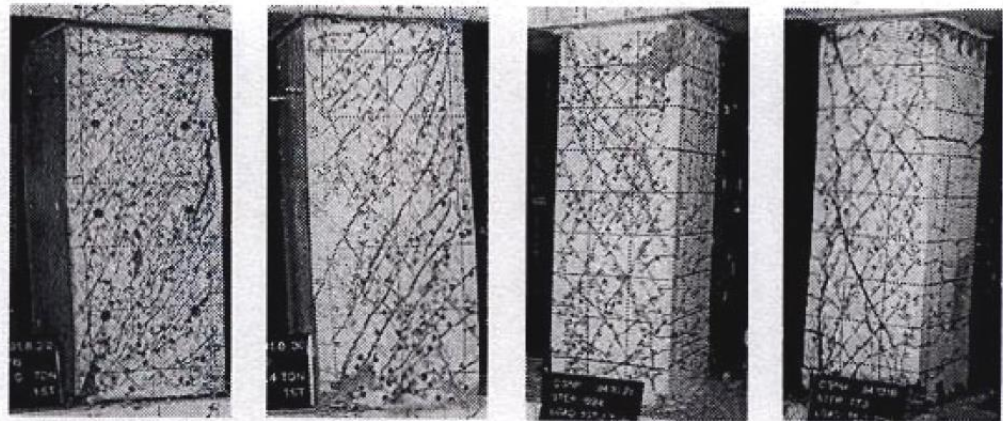
(c)

Gambar 2.19 Letak dan panjang daerah kritis spesimen kolom: (a) Spesimen LN; (b) Spesimen LP; (c) Spesimen LO (Pam dan Ho., 2009)

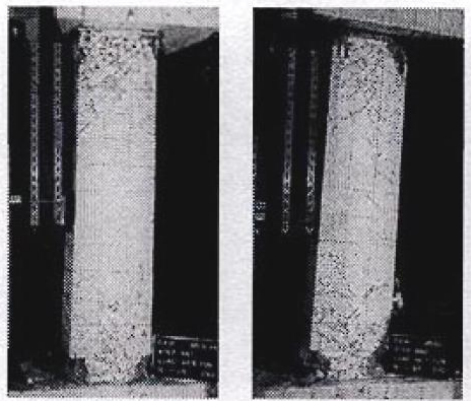
2.6 Kegagalan Kolom Beton Bertulang Berdasarkan Pola Retak Tipikal

Prediksi mode keruntuhan pada kolom beton bertulang sangat penting untuk menjamin keamanan dan ketahanan bangunan terhadap beban gempa. Kegagalan pada elemen beton bertulang, termasuk kolom, dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama yaitu: geser; kegagalan lekatan (*bond splitting*); dan lentur (Alcantara dan Imai, 2000).

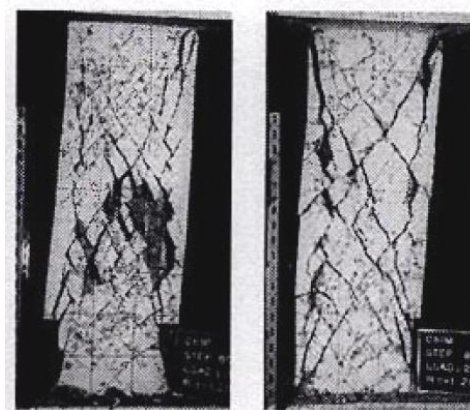
Metode paling dasar untuk menentukan mode kegagalan beton bertulang adalah dengan mengobservasi pola retak pada beton dan lelehnya tulangan baja. Pada penelitian eksperimental, akan timbul retak pada benda uji beton bertulang selama proses pengujian hingga akhirnya beton hancur. Lokasi dan pola retak serta pecahnya beton sangat membantu dalam menentukan tipe kegagalan beton bertulang. Gambar 2.20 menunjukkan pola retak tipikal kegagalan geser pada kolom beton bertulang, dimana terdapat banyak retak geser miring di sepanjang kolom dan retak tersebut akhirnya melebar saat kolom gagal. Gambar 2.21 menunjukkan pola retak kegagalan lentur pada kolom. Retak terkonsentrasi di kedua ujung kolom, yaitu dimana momen maksimum. Kegagalan lentur kemudian ditandai dengan pecahnya beton di kedua ujung kolom. Gambar 2.22 merupakan kolom yang mengalami kegagalan lekatan (*bond splitting failure*). Retak *bond splitting* di sepanjang tulangan utama yang mengalami tegangan ekstrim terlihat menonjol.



Gambar 2.20 Kegagalan geser pada kolom beton bertulang
(Alcantara dan Imai, 2000)



Gambar 2.21 Kegagalan lentur pada kolom beton bertulang
(Alcantara dan Imai, 2000)



Gambar 2.22 Kegagalan lekatan (*bond splitting*) pada kolom beton bertulang (Alcantara dan Imai, 2000)

Aspek lain yang turut membantu dalam menentukan mode kegagalan beton bertulang adalah regangan tulangan baja pada keadaan tegangan maksimum atau tegangan puncak. Pada kolom yang mengalami kegagalan geser, umumnya tulangan transversal akan mengalami leleh. Sedangkan pada kolom yang mengalami kegagalan lentur, tulangan transversal tidak mengalami leleh namun tulangan longitudinal mengalami leleh. Kolom dengan mode kegagalan *bond splitting*, tulangan longitudinal belum mengalami leleh. Dengan kata lain, sebelum tulangan longitudinal mencapai kekuatan leleh, kegagalan lekatan terjadi terlebih dahulu (Alcantara dan Imai, 2000).

Bond splitting failure atau kegagalan lekatan terjadi akibat tegangan lekatan yang tinggi di sekitar beton, disebabkan oleh kekuatan tekan beton yang rendah, digunakannya tulangan longitudinal berdiameter besar dengan kekuatan leleh yang terlalu tinggi atau selimut beton terlalu tipis. Hal ini menyebabkan *splitting crack* timbul di sepanjang tulangan longitudinal. Namun, *splitting crack* juga dapat timbul akibat kegagalan sambungan lewatan (*lap splice failure*). Kegagalan sambungan lewatan terjadi saat gaya pada tulangan longitudinal melebihi gaya yang dapat dibawa oleh sambungan lewatan. Kegagalan terjadi akibat kekangan yang tidak baik (*insufficient confinement*) di sepanjang sambungan dan akibat sambungan lewatan tidak cukup panjang untuk menimbulkan kekuatan tarik tulangan longitudinal. Kegagalan sambungan lewatan ditandai dengan *splitting crack* dan *relative sliding of lapped bars*.

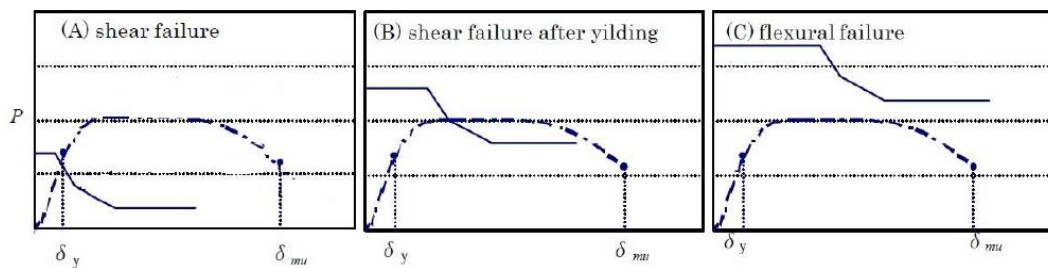
2.7 Mekanisme Keruntuhan

Terdapat tiga kategori kegagalan utama kolom beton bertulang dibawah beban lateral, yaitu kegagalan lentur, kegagalan geser dan kegagalan geser-lentur. *Flexure critical column* yaitu kolom yang memiliki kapasitas geser yang cukup untuk menimbulkan leleh lentur, *shear critical column* adalah kolom yang gagal di geser dengan momen yang lebih kecil dari momen kapasitas dan *flexure-shear critical column* yaitu kolom yang leleh di lentur sebelum gagal di geser di tingkat daktilitas yang lebih tinggi (Wibowo, 2012).

Kolom yang didesain menahan beban lateral idealnya didesain sebagai *flexure critical column*. Namun, meskipun aksi inelastis dominan terhadap lentur, kurangnya tulangan transversal dapat membatasi daktilitas lentur pada kolom yang

dikenakan beban lateral. Kegagalan geser disebabkan kurangnya tulangan transversal, khususnya bila jarak sengkang cukup lebar. Kegagalan geser terjadi di tingkat perpindahan yang relatif rendah dan bahkan dapat terjadi sebelum lelehnya tulangan longitudinal. Umumnya pembebanan inelastis mereduksi kapasitas geser kolom yang berakibat pada kegagalan geser setelah leleh lentur, mode kegagalan kolom dimulai dengan deformasi lentur (tulangan longitudinal telah leleh) dan berakhir di deformasi geser (deformasi geser menjadi lebih dominan). Mode kegagalan ini disebut kegagalan lentur-geser. Kegagalan lentur terjadi akibat kerusakan yang disebabkan oleh deformasi lentur seperti tekuk tulangan longitudinal dan hancur (*crushing*) atau mengelupasnya (*spalling*) beton.

Kegagalan kolom dapat didefinisikan berdasarkan kurva beban lateral-perpindahan. Mode kegagalan bisa berubah tergantung dari titik perpotongan antara kapasitas geser terdegradasi dengan kurva beban lateral-perpindahan (gambar 2.23). Bila titik perpotongan berada sebelum titik leleh kurva beban lateral perpindahan (gambar A) maka kegagalan berupa geser. Bila titik perpotongan berada setelah titik leleh kurva beban lateral perpindahan (gambar B) maka kegagalan berupa geser-lentur. Bila kedua kurva tidak berpotongan, mode kegagalan adalah lentur.

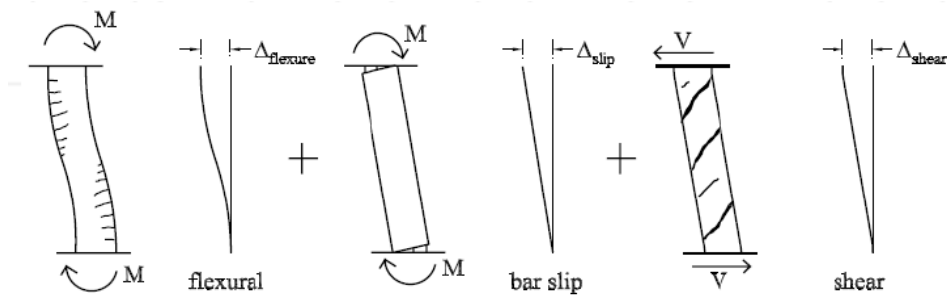


Gambar 2.23 Klasifikasi mode kegagalan kolom

(Sotoud dan Aboutaha, 2014)

2.8 Komponen Perpindahan Lateral

Kolom beton bertulang (kolom jepit-jepit) yang dibebani secara lateral pada kedua ujungnya akan mengalami deformasi lateral total yang terdiri dari tiga komponen, yaitu: deformasi akibat lentur; deformasi akibat *bar slip* atau *yield penetration*; dan deformasi akibat geser (Lodhi, 2012).



Gambar 2.24 Komponen deformasi lateral total pada kolom jepit-jepit
(Lodhi, 2012)

Prediksi perpindahan lentur, geser dan *yield penetration* secara analitis telah banyak dikembangkan dan beberapa diantaranya dijadikan sebagai acuan dalam studi ini.

2.8.1 Perpindahan Lentur

Perpindahan lentur pada kolom terdiri atas komponen elastis dan komponen plastis. Komponen plastis yaitu perpindahan di sepanjang sendi plastis yang secara tipikal berada di ujung kolom. Maka dalam menentukan perpindahan lentur, penting untuk mengetahui panjang sendi plastis yang dimiliki oleh kolom.

$$\Delta_{fl} = \Delta_{fe} + \Delta_{fp} \quad (2.22)$$

Dimana:

Δ_{fl} = perpindahan lentur

Δ_{fe} = perpindahan lentur daerah elastis

Δ_{fp} = perpindahan lentur daerah plastis

Perpindahan elastis Δ_{fe} , dapat dihitung secara sederhana dengan mengintegrasikan kurvatur di sepanjang tinggi kolom,

$$\Delta_{fe} = \int_0^L \phi_y(x) dx = \frac{\phi_y L^2}{3} \quad (2.23)$$

Dimana:

φ_y = kurvatur leleh (*yield curvature*)

L = tinggi kolom

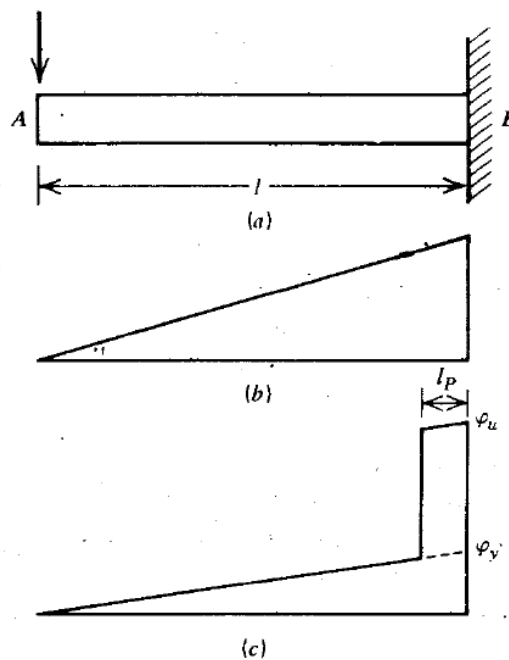
Saat kolom mencapai keadaan ultimit, selain perpindahan akibat rotasi elastis, terdapat pula tambahan perpindahan akibat rotasi inelastic yang terjadi pada daerah sendi plastis kolom. Rotasi inelastic di daerah sendi plastis θ_p setara dengan luasan diagram kurvatur dengan panjang $(\varphi_u - \varphi_y)$ dan lebar l_p ,

$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) l_p \quad (2.24)$$

Dimana:

φ_u = kurvatur ultimit (*ultimate curvature*)

l_p = panjang sendi plastis, yaitu daerah dimana kurvatur plastis dapat dianggap konstan



Gambar 2.25 (a) Struktur kantilever; (b) Diagram momen; (c) Diagram kurvatur

Perpindahan inelastic pada dasar kolom merupakan momen diagram kurvatur pada titik A (gambar 2.14),

$$\Delta_{fp} = (\varphi_u - \varphi_y) l_p \left[L - \frac{l_p}{2} \right] \quad (2.25)$$

Panjang sendi plastis l_p dapat diestimasi menggunakan beberapa persamaan empiris yang terangkum dalam Park dan Paulay (1975) sebagai berikut,

- a. Mattock (1967):

$$l_p = 0.5d + 0.05z \quad (2.26)$$

- b. Sawyer (1964):

$$l_p = 0.25d + 0.075z \quad (2.27)$$

Dimana:

d = panjang efektif penampang kolom (*effective depth*)

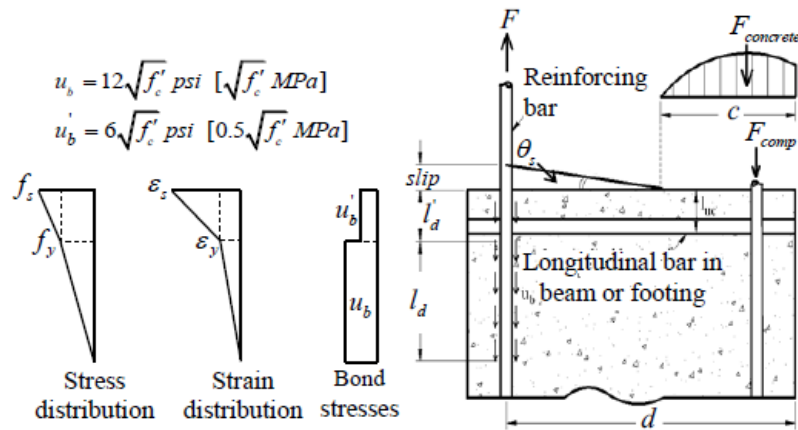
z = panjang bentang geser kolom (*shear span*)

2.8.2 Perpindahan Yield Penetration

Saat tulangan baja yang tertanam pada beton dikenakan suatu beban tarik, regangan akan terakumulasi di sepanjang tulangan yang tertanam tersebut dan menyebabkan tulangan memanjang atau justru terlepas (*slip*) dari beton. Fenomena yang sama terjadi pada kolom beton bertulang dengan beban momen lentur. Beton pada daerah tarik mengalami retak di tahap awal pembebanan akibat kekuatan tarik beton yang lemah, menyebabkan beton tidak lagi efektif mengikat kolom dengan pondasi atau balok. Akibatnya beban tarik dari kolom diteruskan ke balok atau pondasi hanya melalui tulangan baja. Tegangan yang timbul pada tulangan baja tersebut terdistribusi di sepanjang *development length* hingga tegangan mencapai nol pada suatu titik di balok atau pondasi (gambar 2.26). *Development length* yaitu panjang tulangan dimana tegangan akan terdistribusi dan pada akhirnya ditransfer ke beton melalui tegangan lekatan (*bond stress*). Akumulasi dari regangan di sepanjang *development length* menyebabkan tulangan baja memanjang dan terjadi *rocking body rotation* pada kolom (gambar 2.24). Hal tersebut menyebabkan

adanya perpindahan lateral yang nilainya mencapai 25% hingga 40% dari deformasi lateral total (Sezen, 2002).

Analisa deformasi lentur menggunakan momen-kurvatur belum memperhitungkan tambahan deformasi akibat lepasnya tulangan (*reinforcement slip*) pada ujung kolom. Deformasi ini menambah total deformasi lateral yang terjadi pada kolom. Karenanya, deformasi *yield penetration* harus dihitung secara terpisah dan hasilnya ditambahkan ke deformasi lateral akibat lentur dan geser.



Gambar 2.26 Model reinforcement slip
(Sezen dan Serzler, 2008)

Alogaritma untuk menentukan perpindahan *yield penetration* cukup kompleks, maka dikembangkan persamaan yang lebih sederhana dan merupakan fungsi dari rasio tulangan longitudinal dan rasio beban aksial (Wibowo, 2012). Untuk setiap nilai momen dan kurvatur yang didapat dari analisa lentur, hubungan momen dan kurvatur untuk perpindahan *yield penetration* dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$M_{yp} = \left[0.6 + 0.8\rho_v + 1.7 \frac{n}{\rho_v} \right] M_{flexural} \quad (2.28)$$

$$\varphi_{yp} = 1.1 \varphi_{flexural} \quad (2.29)$$

Poin yang perlu diperhatikan adalah, persamaan simplifikasi ini hanya dikembangkan untuk dua parameter yang divariasikan, yaitu rasio tulangan longitudinal dan rasio beban aksial. Maka pada studi ini, dimana terdapat parameter lain yaitu rasio tulangan transversal dan sambungan lewatan (*lap splice*) tulangan longitudinal, perlu ditinjau apakah persamaan tersebut masih valid atau butuh penyesuaian.

2.8.3 Perpindahan Geser

Kontribusi perpindahan geser terhadap perpindahan total sangatlah kecil maka tidak digunakan analisa yang rumit untuk memprediksi perpindahan geser spesimen kolom beton bertulang. Telah banyak peneliti yang mengembangkan model perpindahan geser, diantaranya Park dan Pulay (1975), Lehman dan Moehle (2000) dan Sezen (2002). Namun pada studi ini, perpindahan geser teoritis tidak dihitung dan nilai perpindahan geser mengandalkan hasil eksperimental.

2.9 *Drift* pada Kegagalan Beban Lateral

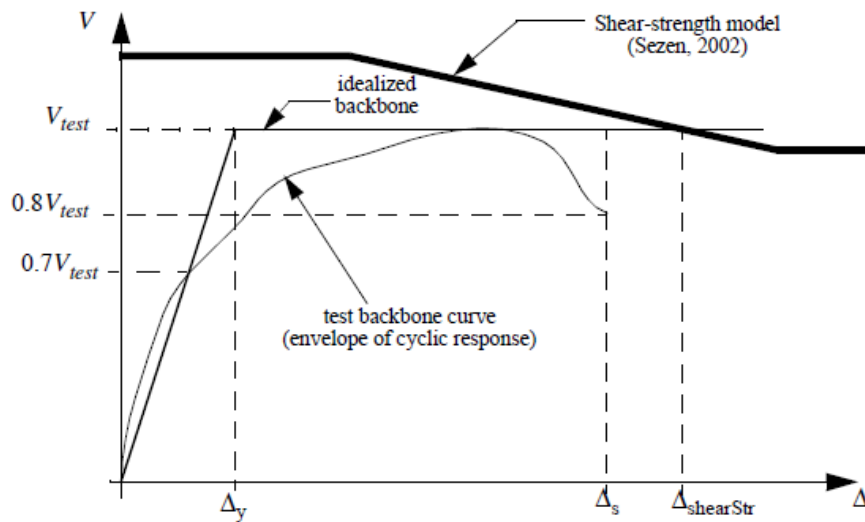
Kolom beton bertulang ringan rentan terhadap kegagalan geser setelah terjadi leleh akibat lentur. Setelah terjadi leleh akibat lentur, kebutuhan *force demand* pada kolom akan cenderung konstan sedangkan *displacement demand* meningkat, menunjukkan perlunya model untuk memprediksi kapasitas *drift* saat kegagalan geser untuk kolom dengan kegagalan lentur-geser (Elwood dan Moehle, 2003). Prediksi teoritis terhadap kegagalan lateral kolom (80% kapasitas beban lateral puncak) telah dikembangkan diantaranya oleh Sezen (2002), Elwood dan Moehle (2003) dan Wibowo (2012).

2.9.1 Sezen (2002)

Model yang diusulkan oleh Sezen (2002) menghubungkan kapasitas geser kolom dengan kebutuhan (*demand*) daktilitas perpindahan. Seperti yang telah disebutkan pada sub bab 2.6.3.1, kapasitas geser komponen beton bertulang V_n terdiri dari dua bagian, yaitu kapasitas geser dari beton V_c dan kapasitas geser dari tulangan transversal V_s .

$$V_n = k(V_c + V_{st}) = k \left[\frac{0.5\sqrt{f'_c}}{L/d} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5\sqrt{f'_c}A_g}} \right] 0.80A_g + k \left[\frac{A_v f_{yt} d}{s} \right] \quad (2.30)$$

Spesimen kolom dengan perpindahan leleh (*yield displacement*) tertentu dapat diprediksi berapa *drift* saat kegagalan geser menggunakan model kapasitas geser tersebut (gambar 2.25). Perpindahan saat kegagalan geser yang didasarkan pada model kapasitas geser, adalah perpindahan dimana *idealized backbone curve* berpotongan dengan kurva model kapasitas geser seperti yang terlihat pada gambar 2.25.



Gambar 2.27 Perpindahan saat kegagalan geser berdasarkan model kapasitas geser oleh Sezen (2002)
(Elwood dan Moehle, 2003)

Perbandingan *drift* saat kegagalan geser antara penelitian dengan model analitis berdasarkan kekuatan geser telah dilakukan oleh Elwood dan Moehle (2003) serta Wibowo (2012). Hasil perbandingan mengindikasikan bahwa model kapasitas geser tidak bisa secara akurat memprediksi *drift* saat kegagalan geser. Sezen (2002) juga tidak merekomendasikan menggunakan model kapasitas geser untuk memprediksi *drift* saat kegagalan geser karena variasi kecil pada kekuatan geser (atau kekuatan lentur) menyebabkan perubahan besar pada prediksi *drift* saat kegagalan geser.

2.9.2 Elwood dan Moehle (2003)

Elwood dan Moehle mengembangkan model empiris untuk memprediksi *drift* pada kegagalan geser untuk bangunan dengan kolom yang kritis terhadap geser (*shear-critical column*). Berdasarkan penelitian, persamaan empiris untuk memprediksi *drift* saat kegagalan geser diberikan sebagai berikut.

$$\delta_{lf} = \frac{\Delta_s}{L} = \frac{3}{100} + 4\rho'' - \frac{1}{500} \frac{v}{\sqrt{f'_c}} - \frac{1}{40} \frac{P}{A_g f'_c} \geq \frac{1}{100} \text{ (satuan psi)} \quad (2.31)$$

Dimana:

δ_{lf} = *drift* saat kegagalan geser (kegagalan lateral – *lateral failure*)

Δ_s = perpindahan lateral saat kegagalan geser

ρ'' = rasio tulangan transversal = A_v/bs

v = tegangan geser nominal maksimum yang didapat dari penelitian = V_{test}/bd

P = beban aksial

V_{test} = gaya geser puncak (dari penelitian)

2.9.3 Wibowo (2012)

Prediksi *drift* pada kegagalan geser menggunakan model kapasitas geser oleh Sezen (2002) menggambarkan kecenderungan peningkatan *drift* kolom pada kegagalan geser saat terjadi peningkatan beban aksial. Padahal, penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban aksial menyebabkan kecenderungan penurunan *drift* pada kegagalan geser.

Wibowo (2012) memberikan faktor reduksi kekuatan (k_μ) untuk menggambarkan degradasi kekuatan geser kolom beton bertulang dengan peningkatan rasio beban aksial dan atau aspek rasio kolom (gambar 2.26).

$$V' = k_\mu(V_n) = k_\mu(V_c + V_s) \quad (2.32)$$

Dimana:

V' = kekuatan geser tereduksi

k_μ = faktor degradasi kekuatan

V_n = kekuatan geser kolom

Faktor reduksi kekuatan (k_μ) merupakan fungsi dari kemiringan degradasi k dengan daktilitas μ (gambar 2.27) dan dihitung dengan persamaan,

$$k_\mu = 1 - k(\mu - \alpha) = 1 - \frac{0.3 e^{5.7n}}{9 - a} (\mu - \alpha) \quad (2.33)$$

Dimana:

a = aspek rasio kolom = L/D

n = rasio beban aksial

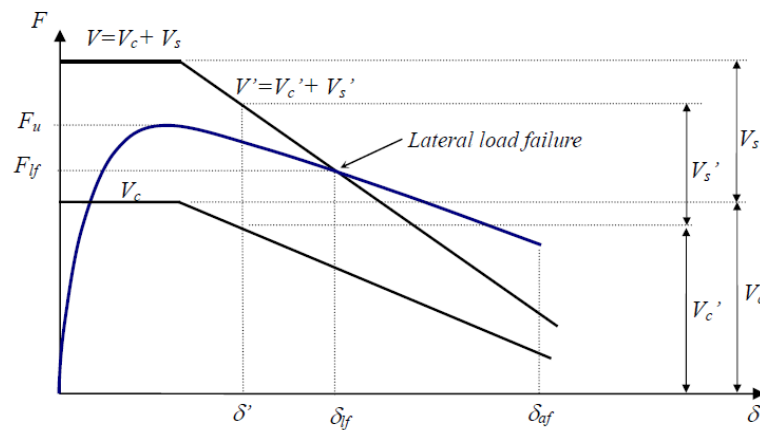
α = daktilitas *drift* ketika kekuatan geser mulai menurun

$\alpha = 1$ untuk $a \geq 3$

$\alpha = 2$ untuk $a < 3$

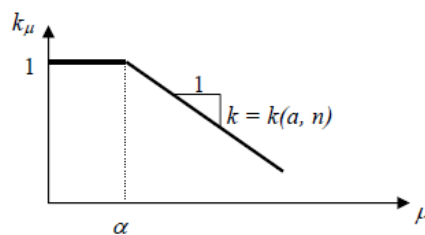
$k_\mu = 1$ untuk $\mu < \alpha$

$k_\mu = 0$ untuk $\mu > 1 + (1/k)$



Gambar 2.28 Hubungan antara kapasitas geser beton dan rasio daktilitas

(Wibowo, 2012)



Gambar 2.29 Faktor reduksi kekuatan k_μ

(Wibowo, 2012)

Drift saat kegagalan geser atau kegagalan lateral dapat diprediksi sebagai titik potong antara kurva beban-*drift* (dari analisis momen-kurvatur) dengan kurva degradasi kekuatan geser.

$$\delta_{lf} = \frac{\delta_y}{k} \left[(1 + k\alpha) - 0.8 \frac{F_u}{V_n} \right] \quad (2.34)$$

Dimana:

F_u = kekuatan lentur puncak

2.10 *Drift* pada Kegagalan Beban Aksial

Model analitis untuk memprediksi *drift* pada kegagalan aksial dikembangkan oleh Elwood dan Moehle (2003) serta Wibowo (2012).

2.10.1 Elwood dan Moehle (2003)

Elwood dan Moehle (2003) mengembangkan model untuk memprediksi rasio *drift* saat kegagalan beban aksial yang didasarkan oleh friksi geser. Model dikembangkan untuk kolom beton bertulang yang *shear-critical* sebagai fungsi dari tulangan transversal dan beban aksial.

$$\delta_{af} = \frac{4}{100} \frac{1 + (\tan \theta)^2}{\tan \theta + P \left(\frac{s}{A_v f_{yh} d_c \tan \theta} \right)} \quad (2.35)$$

Dimana:

d_c = kedalaman inti beton dihitung dari as ke as sengkang

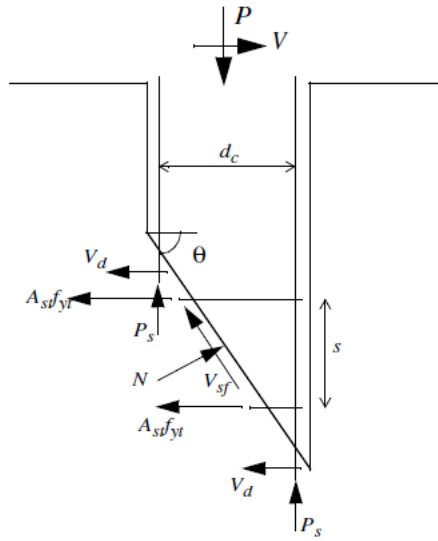
s = jarak tulangan transversal

A_v = luas tulangan transversal

f_{yh} = tegangan leleh tulangan transversal

P = beban aksial

θ = sudut kritis retak (diasumsikan 65°)



Gambar 2.30 Diagram *free-body* setelah kegagalan geser
(Elwood dan Moehle, 2003)

2.10.2 Wibowo (2012)

Berdasarkan hasil penelitian oleh Wibowo (2012), *drift* saat kegagalan aksial meningkat seiring peningkatan rasio tulangan transversal dan penurunan rasio beban aksial. Efek rasio tulangan longitudinal dipengaruhi oleh rasio beban aksial P dan beban aksial kondisi seimbang P_{ub} . Berdasarkan hasil tersebut, model empiris untuk memprediksi *drift* saat kegagalan aksial diberikan sebagai berikut.

$$\delta_{af} = 5(1 + \rho_v)^{-\left[\frac{1}{1-\beta}\right]} + 7\rho_h + \frac{1}{5n} \quad (2.36)$$

$$\beta = \frac{n}{n_b} \quad (2.37)$$

$$n = \frac{P}{bDf'_c} \quad (2.38)$$

Dimana:

- ρ_v = rasio tulangan longitudinal
- ρ_h = rasio luas tulangan transversal
- n = rasio beban aksial
- n_b = rasio beban aksial kondisi seimbang
- P = beban aksial

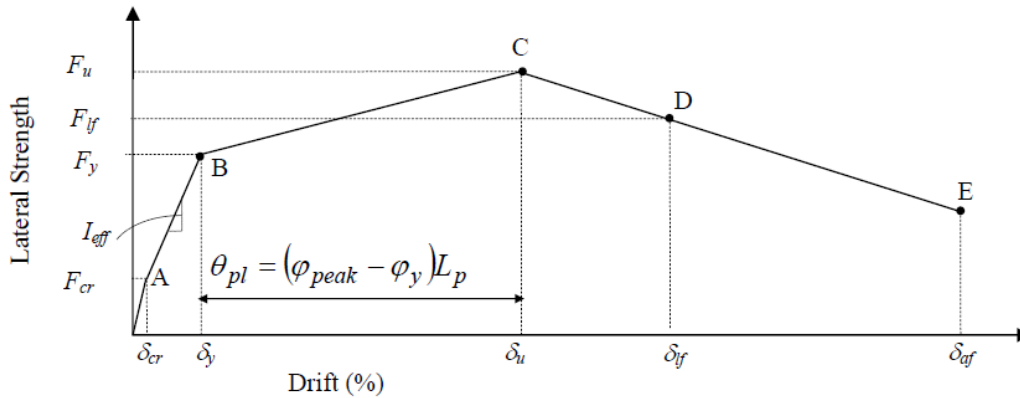
Perlu diperhatikan bahwa model empiris yang dikembangkan oleh Wibowo (2012) terbatas pada kolom dengan parameter pada rentang tertentu yaitu:

- Rasio tulangan longitudinal $\rho_v \leq 2\%$
- Rasio tulangan transversal $\rho_h \leq 0.4\%$
- Rasio beban aksial $0.1 \leq n < n_b$

2.11 Model Kekuatan Lateral-Drift untuk Desain

2.11.1 Backbone curve model

Wibowo (2012) mengembangkan model analitis untuk memprediksi perilaku beban-drift untuk kolom beton bertulangan ringan yang dibutuhkan pada desain kolom baru. Model simplifikasi tersebut didasarkan pada metodologi desain yang didasarkan pada perpindahan (*displacement based design methodology*). Gambar 2.28 menunjukkan model simplifikasi beban lateral-drift dengan komponen retak (*crack*), leleh (*yield*), kekuatan puncak (*peak strength*), kegagalan lateral (80% beban puncak) dan kegagalan aksial.



Gambar 2.31 Backbone curve model

(Wibowo, 2012)

1. Titik A (*retak*)

Kekuatan lateral saat retak beserta *drift* dihitung dengan persamaan berikut.

$$F_{cr} = \frac{M_{cr}}{L} \quad (2.39)$$

$$\delta_{cr} = \frac{M_{cr} L}{3 E_c I_g} \quad (2.40)$$

2. Titik B (leleh)

Drift saat leleh dan beban lateral saat leleh dihitung dengan persamaan berikut.

$$F_y = \frac{M_y}{L} \quad (2.41)$$

$$\delta_y = \frac{M_y L}{3 E_c I_{eff}} \quad (2.42)$$

Dimana:

$$I_{eff} = 0.7 I_g \quad \text{untuk rasio beban aksial } n \geq 0.5$$

$$I_{eff} = 0.5 I_g \quad \text{untuk rasio beban aksial } n < 0.3$$

Untuk nilai rasio beban aksial $0.3 \leq n < 5$, nilai I_{eff} didapatkan dengan interpolasi. Untuk kolom beton bertulangan ringan, nilai momen leleh M_y dapat digantikan dengan ϕM_u .

3. Titik C (puncak kekuatan)

Untuk penyederhanaan, dengan mengeliminasi luas tulangan tekan, beban lateral puncak F_u dan *drift* saat beton retak (*fracture*) δ_u , didapat dengan persamaan berikut.

$$F_u = \frac{M_u}{L} \quad (2.43)$$

$$\delta_u = \delta_y + \delta_{pl} \quad (2.44)$$

$$\delta_{pl} = (\varphi_u - \varphi_y) L_p \quad (2.45)$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_c}{k_u d} \quad (2.46)$$

$$\varphi_y = \frac{3\delta_y}{L} \quad (2.47)$$

$$k_u = \frac{N + A_{st} f_y}{0.85 f'_c \gamma d b} \quad (2.48)$$

$$\varepsilon_c = 0.004 + 1.4 \rho_s \varepsilon_{sm} \frac{f_{yh}}{f'_c} \quad (2.49)$$

Dimana:

ε_{sm} = regangan baja saat *strain-hardening*

Nilai ε_c dapat pula diestimasi antara 0,5% hingga 0,8%.

4. Titik D (kegagalan lateral)

Kekuatan lateral saat kegagalan beban lateral (F_{lf}) diambil 80% dari kekuatan lateral puncak. Sedangkan *drift* saat kegagalan beban lateral diambil dari persamaan 2.75.

$$F_{lf} = 0.8F_u \quad (2.50)$$

$$\delta_{lf} = \frac{\delta_y}{k} = \left[(1 + k\alpha) - 0.8 \frac{F_u}{V_n} \right] \quad (2.51)$$

5. Titik E (kegagalan aksial)

Drift saat kegagalan aksial dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\delta_{af} = 5(1 + \rho_v)^{-\left[\frac{1}{1-\beta}\right]} + 7\rho_h + \frac{1}{5n} \quad (2.52)$$

Kekuatan lateral saat kegagalan aksial bisa diekstrapolasi dengan mengasumsi penurunan konstan kemiringan (*slope*) pada kurva di gambar 2.31 (titik C, D, E).

2.11.2 Simplified Code Bi-linear Model

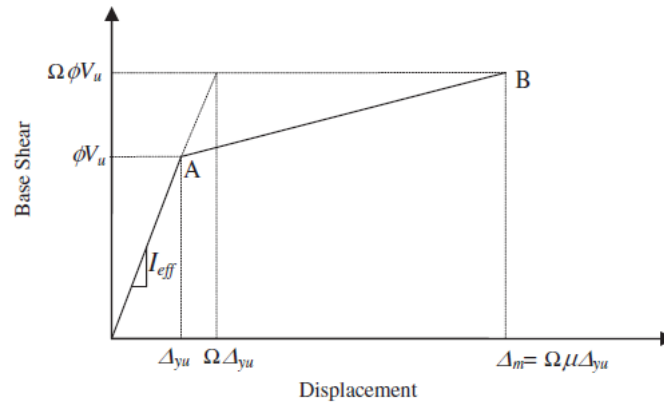
Simplified code bi-linear model didasarkan pada asumsi bahwa perilaku inelastis digambarkan oleh faktor daktilitas μ dan faktor *overstrength* Ω . Faktor daktilitas tergantung pada tingkat daktilitas dan untuk kolom beton bertulangan ringan, faktor daktilitas yang rendah $\mu = 2$ dan faktor *overstrength* $\Omega = 1,3$ dapat diasumsikan (Wibowo, 2012).

Model bi-linear dibuat dengan mengestimasi perpindahan lentur Δ_{yu} sebagai hasil bagi antara kekuatan geser terfaktor ϕV_u dengan kekakuan efektif (*effective stiffness*) I_{eff} . Estimasi konservatif nilai I_{eff} adalah,

$$I_{eff} = 0.7 I_g \quad \text{untuk rasio beban aksial } n \geq 0.5$$

$$I_{eff} = 0.5 I_g \quad \text{untuk rasio beban aksial } n < 0.3$$

Untuk nilai rasio beban aksial $0.3 \leq n < 5$, nilai I_{eff} didapatkan dengan interpolasi. Perpindahan maksimum Δ_m dihitung dengan mengkalikan perpindahan leleh Δ_{yu} dengan faktor daktilitas dan *overstrength* ($\mu \Omega$).



Gambar 2.32 *Simplified code bi-linear model*

(Wibowo, 2012)

Simplified bi-linear model digunakan sebagai alat estimasi perpindahan saat beban puncak yang cepat dan konservatif dan sebagai alat pengecekan performa awal seismik yang didasarkan pada prinsip perpindahan. Model ini tidak bertujuan untuk memprediksi *drift* saat kegagalan lateral maupun kegagalan aksial, melainkan merupakan metode praktis untuk mengecek perpindahan puncak sehingga dapat diketahui apakah dibutuhkan studi lebih lanjut.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Benda Uji

Kolom beton bertulangan ringan adalah kolom dengan rasio tulangan longitudinal rendah serta detail yang tidak daktail. Implikasinya, kolom cenderung memiliki jarak sengkang yang hanya dapat memberikan kekangan minim pada kolom. Detail sambungan lewatan umumnya menitikberatkan pada transfer gaya tekan dan mengabaikan transfer gaya tarik, memberikan sambungan lewatan yang pendek, tidak terkekang dan berada di daerah kritis.

Pada studi ini, kolom dibagi menjadi delapan spesimen dengan tiga variabel yang berbeda, yaitu rasio tulangan longitudinal, jarak sengkang dan lokasi sambungan lewatan tulangan longitudinal. Volume tulangan transversal berhubungan erat dengan kapasitas geser dan kekangan pada kolom, secara langsung mempengaruhi kapasitas *drift* dalam menahan beban lateral. Sambungan lewatan yang tidak memadai pada kolom bisa menjadi penyebab kegagalan kolom apabila diletakkan pada daerah yang tidak tepat, yaitu daerah kritis. Penempatan sambungan lewatan diluar daerah kritis diprediksi berpotensi menggeser sendi plastis kolom menjauhi titik momen terbesar yang berada tepat di dasar kolom. Studi ini terfokus kepada pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kolom beton bertulangan ringan dengan dua tingkatan rasio tulangan longitudinal yang berbeda (Tabel 1.1).

Tabel 3.1 Desain Benda Uji Kolom

Rasio Tulangan Longitudinal (ρ_v)	Jarak Sengkang (s)	Lokasi Sambungan Lewatan
0,8%	150 mm	Dalam daerah kritis
		Luar daerah kritis
	250 mm	-
1,1%	150 mm	Dalam daerah kritis
		Luar daerah kritis
	250 mm	-

3.1.1 Dimensi Spesimen Kolom

Spesimen kolom dimodelkan sebagai kolom kantilever yang terjepit di satu ujung dan bebas di ujung lainnya. Titik balik momen dari kolom dengan kelengkungan ganda diasumsikan terjadi pada ujung bebas kolom kantilever. Desain spesimen kolom turut mempertimbangkan pula keterbatasan alat pengujian yang ada di laboratorium. Tinggi kolom ditentukan untuk memastikan kapasitas geser kolom cukup untuk membangun kapasitas lentur puncak kolom sehingga kegagalan getas akibat geser dapat dihindari. Terutama pada spesimen dengan sambungan lewatan tulangan longitudinal, desain kolom harus dapat memastikan kegagalan adalah akibat sambungan lewatan dan bukan akibat geser. Hasilnya adalah spesimen kolom dengan dimensi penampang 150 x 160 mm dan tinggi 640 mm ke titik aplikasi beban. Dari geometri spesimen kolom tersebut, didapatkan kolom dominasi lentur (*flexure dominated column*) dengan rasio bentang geser dan panjang (*shear span to depth ratio*) sebesar 4.

3.1.2 Rasio Tulangan Longitudinal

Rasio tulangan longitudinal dapat dikatakan rendah bila berada dikisaran 0,5% hingga 1,5% (Wibowo dkk., 2010). Pemakaian presentase tulangan longitudinal kurang dari 1% luas penampang bruto sebenarnya tidak dianjurkan dalam SNI 03-2847-2002 pasal 12.9(1). Diperkirakan jika jumlah tulangan kurang dari 1%, akan terjadi keruntuhan non daktail yang mendadak, seperti yang dapat terjadi pada kolom beton murni (McCormac & Brown, 2014). Namun, penggunaan rasio tulangan longitudinal di bawah 1% pada kolom dominan lentur terbukti masih mampu mengakomodasi kebutuhan gaya tarik yang timbul akibat momen lentur, terlebih bila kolom dikenakan beban aksial yang rendah. Peningkatan rasio tulangan longitudinal dalam rentang 1% hingga 1,5% justru memperkaku kolom dan mereduksi kapasitas geser kolom secara lebih cepat, menyebabkan kegagalan lateral dan aksial terjadi di *drift* yang lebih pendek. Mempertimbangkan kedua perilaku tersebut, spesimen kolom dibagi atas dua bagian utama dalam studi ini, yaitu spesimen kolom dengan $\rho_v = 0,8\%$ dan $\rho_v = 1,1\%$. Masing-masing bagian kemudian dipecah lagi atas dua parameter lain yang dapat menjadi penyebab kegagalan kolom beton bertulang, yaitu jarak sengkang dan lokasi sambungan

lewatan. Dengan demikian diharapkan akan diketahui perubahan perilaku kolom dengan adanya peningkatan rasio tulangan longitudinal yang mana perilaku tersebut juga tidak akan lepas dari pengaruh dua parameter yang lain.

3.1.3 Jarak Sengkang

Fungsi utama sengkang dalam desain kolom adalah untuk mencegah tekuk tulangan longitudinal, menyediakan kapasitas geser dan mencegah terjadinya kegagalan geser, serta mengekang inti beton sehingga kolom memiliki daktilitas yang cukup dalam menahan deformasi inelastis akibat beban lateral yang besar. Jarak sengkang yang lebar pada kolom berakibat pada kekangan inti beton yang tidak memadai (*lack of confinement*). Meskipun jarak sengkang yang terlalu rapat juga tidak dianjurkan karena melemahkan kontinuitas beton dan memberikan *plane* yang lemah antara inti dan selimut beton, selain juga berkaitan dengan permasalahan konstruksi yang dapat ditimbulkan akibat kurungan kolom (*column cage*) yang terlalu rapat.

Penentuan variabel jarak sengkang dalam studi ini mempertimbangkan akan jarak dsengkang maksimum yang diperbolehkan dalam standar. Perlu diperhatikan bahwa fokus utama penentuan jumlah tulangan transversal adalah kualitas kekangan yang dapat diberikan oleh spesimen kolom, dan bukan kekuatan gesernya. SNI 03-2847-2002 pasal 9.10(5) menyebutkan bahwa spasi vertikal sengkang tidak boleh melebihi 16 kali diameter tulangan longitudinal, 48 kali diameter sengkang, atau ukuran terkecil dari komponen struktur tekan. Untuk merepresentasikan detail kolom yang tidak daktail, dalam studi ini jarak sengkang dibuat melebihi jarak maksimum yang diperbolehkan (tabel 1.2.). Kapasitas deformasi inelastis kolom akan semakin berkurang seiring dengan semakin minimnya kekangan yang disediakan oleh sengkang. Variabel jarak sengkang dibuat sedemikian sehingga spesimen kolom yang satu memiliki rasio volume tulangan transversal sekitar dua kali lipat lebih tinggi dari spesimen kolom yang lain. Dengan demikian, diharapkan dapat diketahui pengaruh kekangan yang minim terhadap kolom beton dengan rasio tulangan longitudinal yang rendah.

Tulangan transversal pada spesimen kolom didesain dapat menyediakan kapasitas geser yang cukup untuk mencegah terjadinya kegagalan geser sebelum

lelehnya tulangan longitudinal. Terlihat pada tabel 1.5, kapasitas geser kolom lebih tinggi hingga 20% dari kebutuhan gesernya, menyebabkan kegagalan *shear-critical* yang getas hampir pasti dapat dihindari dan keruntuhan *flexure-shear critical* yang diharapkan dapat dicapai (gambar 2.23).

Tabel 3.2 Detail Variabel Tulangan Transversal

Parameter Tulangan Transversal		$\rho_v = 0,8\%$		$\rho_v = 1,1\%$	
Jarak sengkang maksimum (mm)		122		146	
Variabel jarak sengkang (mm)		150	250	150	250
Rasio volume (<i>volumetric ratio</i>) (%)		0.61	0.36	0.61	0.36
Rasio luas (<i>area ratio</i>) (%)		0.35	0.21	0.35	0.21

3.1.4 Sambungan Lewatan Tulangan Longitudinal

Salah satu akibat dari diterapkannya detail kolom yang tidak daktail adalah sambungan lewatan tulangan longitudinal yang pendek, tidak terkekang dan berada di daerah kritis. Seiring dengan siklus simpangan yang semakin meningkat, selimut beton di sepanjang sambungan akan mulai retak dan pecah, disusul kemudian oleh kapasitas lateral yang menurun secara drastis akibat transfer gaya yang buruk di sepanjang sambungan. Penempatan sambungan lewatan longitudinal di luar daerah kritis, yaitu dimana tidak terjadi kerusakan kolom yang berlebih, dapat mencegah terjadinya kegagalan sambungan yang prematur.

Pada studi ini, panjang sambungan lewatan menjadi variabel kontrol sedangkan variabel bebasnya adalah letak sambungan lewatan tulangan longitudinal. Digunakan sengkang berjarak 150 mm pada spesimen kolom dengan sambungan lewatan untuk memastikan kegagalan sambungan lewatan dan bukan kegagalan geser. Panjang sambungan lewatan disediakan sekitar 65% dari yang dibutuhkan, berdasar atas SNI 03-2847-2002 pasal 14(15), agar tegangan leleh tulangan longitudinal akibat tarik dapat tercapai (tabel 1.4). Hal ini berarti bahwa kegagalan sambungan lewatan (ditandai penurunan kapasitas lateral kolom) diperkirakan terjadi saat momen pada kolom mencapai sekitar 60% hingga 80% dari kapasitas momen nominal kolom (Melek & Wallace, 2004).

Persamaan yang digunakan dalam menghitung panjang sambungan lewatan minimum l_d yang diperlukan untuk mentransfer gaya tarik menurut SNI 03-2847-2002 adalah,

$$l = 1,3l_d$$

$$l_d = \frac{12 f_y \alpha \beta \lambda}{25 \sqrt{f'_c}} d_b > 300mm$$

Dimana:

α = faktor lokasi penulangan

β = faktor pelapis tulangan

λ = faktor beton agregat ringan

d_b = diameter tulangan longitudinal

Sambungan lewatan yang tidak memadai tersebut diletakkan di daerah kritis dan di luar daerah kritis. Penelitian oleh Pam dan Ho (2009) membuktikan bahwa ketika sambungan lewatan dengan panjang yang memadai diposisikan di luar daerah kritis, kolom beton bertulang akan berperilaku selayaknya kolom tanpa sambungan. Namun, apabila sambungan lewatan memiliki panjang yang terlalu pendek untuk dapat meneruskan gaya tarik dengan baik, ada kemungkinan area kerusakan atau area sendi plastis kolom akan bergeser menjauhi titik momen terbesar di ujung kolom akibat adanya slip di sepanjang sambungan.

Tabel 3.3 Detail Variabel Sambungan Lewatan Tulangan Longitudinal

ρ_v	l_{s_perlu} (mm)	l_{s_pakai} (mm)	$\frac{l_{s_perlu}}{l_{s_pakai}}$
0,8%	309	200	0.65
1,1%	387	250	0.65

3.2 Deskripsi Beban Uji

Spesimen kolom berupa kolom kantilever dengan tinggi 640 mm dan dimensi penampang 150 x 160 mm. Spesimen kolom memiliki skala geometri 1:3. Pondasi dasar didesain secara konservatif untuk mencegah terjadinya pergerakan pada spesimen dan memastikan pondasi memiliki kapasitas yang lebih sehingga kerusakan terpusat di kolom. Semua spesimen diperkuat dengan empat tulangan longitudinal, empat spesimen dengan diameter 7,6 mm ($\rho_v = 0,8\%$) dan empat sisanya dengan diameter 9,1 mm ($\rho_v = 1,1\%$). Kekangan pada kolom berupa tulangan transversal berdiameter 5,9 mm yang dipasang dengan jarak 150 mm dan 250 mm. Tulangan longitudinal menerus di sepanjang kolom pada empat spesimen, sedangkan empat spesimen lain memiliki sambungan lewatan tulangan longitudinal yang diposisikan di daerah kritis dan di luar daerah kritis. Panjang sambungan tulangan longitudinal secara praktis diambil 67% dari tulangan longitudinal perlu yang dihitung berdasarkan SNI 03-2847-2002, menghasilkan sambungan lewatan tarik sepanjang 200 mm ($\rho_v = 0,8\%$) dan 250 mm ($\rho_v = 1,1\%$). Tebal selimut beton 20 mm sedangkan kuat tekan beton berbeda-beda di tiap spesimen. Ringkasan detail spesimen kolom dapat dilihat pada tabel 3.4 dan gambar 3.1 hingga 3.5.

Tabel 3.4 Properti Spesimen Kolom

Nama Kolom	Dimensi Kolom (mm)	Tinggi kolom (mm)	ρ_v (%)	Tulangan Longitudinal	ρ_h		Tulangan Transversal	n	f _c (MPa)	Posisi sambungan lewatan	l _d (mm)
					Area	Volume					
L15C	150 x 160	640	0.76	4 ϕ - 8	0.35	0.61	ϕ 6 - 150 mm	0.1	22.5	-	-
L25C	150 x 160	640	0.76	4 ϕ - 8	0.21	0.36	ϕ 6 - 250 mm	0.1	22.6	-	-
M15C	150 x 160	640	1.10	4 ϕ - 10	0.35	0.61	ϕ 6 - 150 mm	0.1	26.9	-	-
M25C	150 x 160	640	1.10	4 ϕ - 10	0.21	0.36	ϕ 6 - 250 mm	0.1	21.9	-	-
L15SB	150 x 160	640	0.76	4 ϕ - 8	0.35	0.61	ϕ 6 - 150 mm	0.1	25.2	<i>Bottom</i>	200
L15SM	150 x 160	640	0.76	4 ϕ - 8	0.35	0.61	ϕ 6 - 150 mm	0.1	22.1	<i>Middle</i>	200
M15SB	150 x 160	640	1.10	4 ϕ - 10	0.35	0.61	ϕ 6 - 150 mm	0.1	25.4	<i>Bottom</i>	250
M15SM	150 x 160	640	1.10	4 ϕ - 10	0.35	0.61	ϕ 6 - 150 mm	0.1	25.2	<i>Middle</i>	250

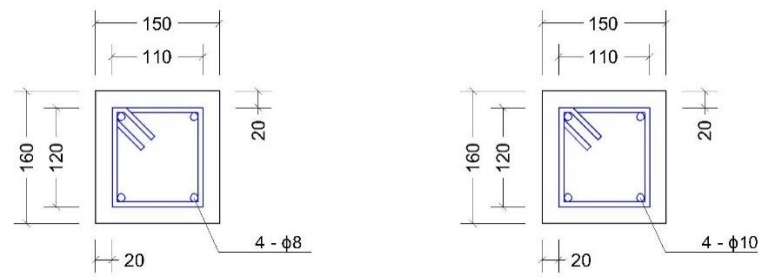
Keterangan:

ρ_v = rasio tulangan longitudinal

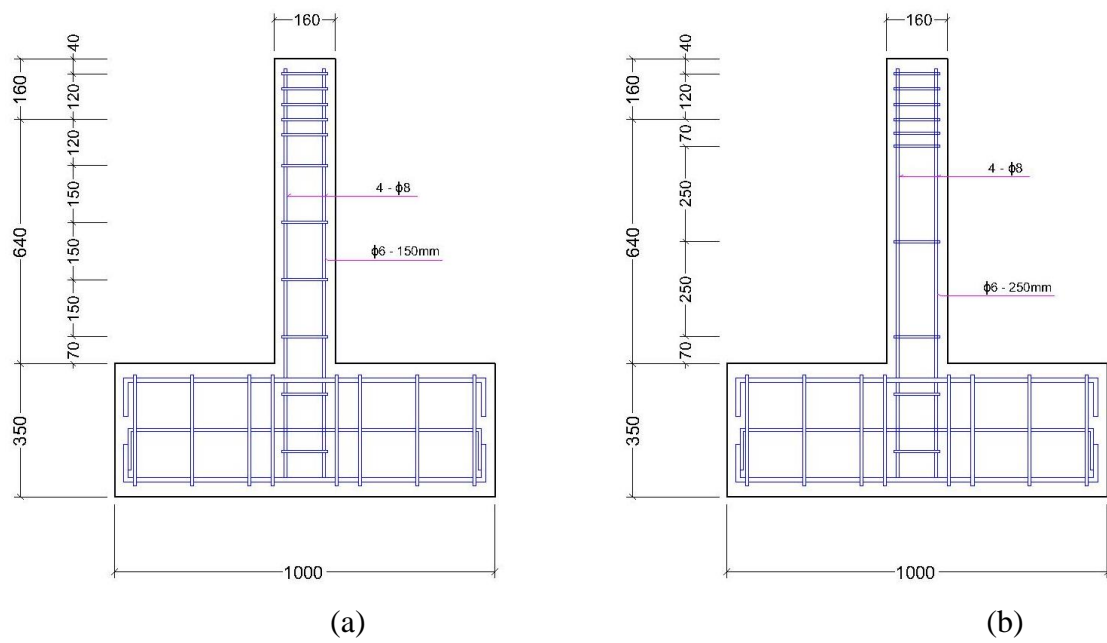
ρ_h = rasio tulangan transversal

n = rasio beban aksial

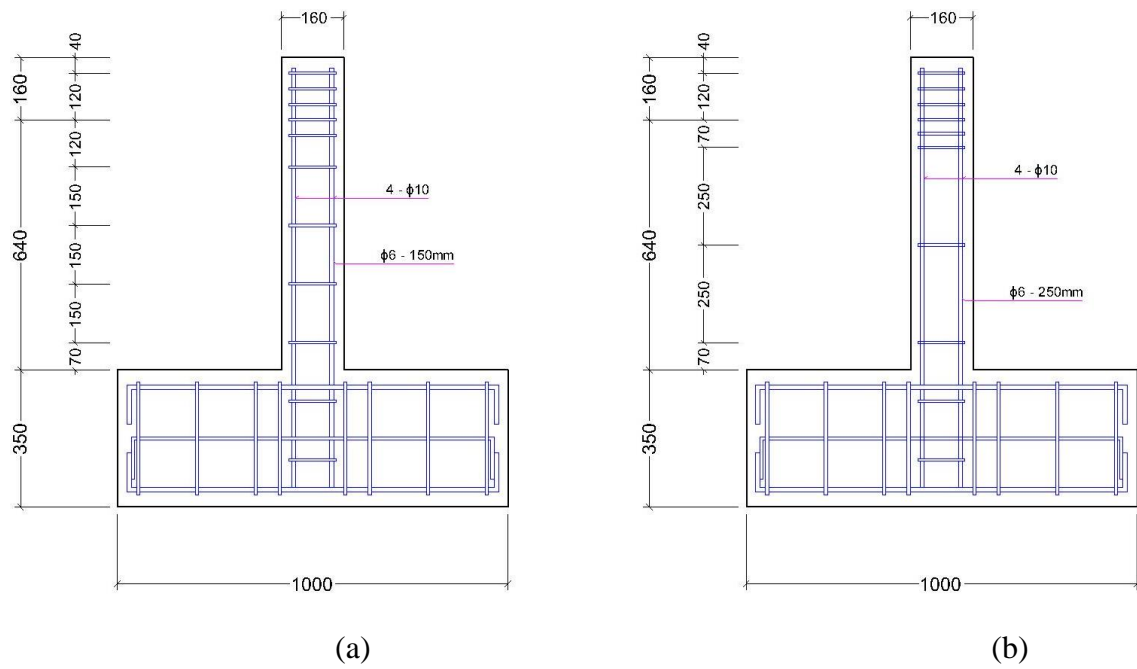
l_d = panjang sambungan lewatan tulangan longitudinal



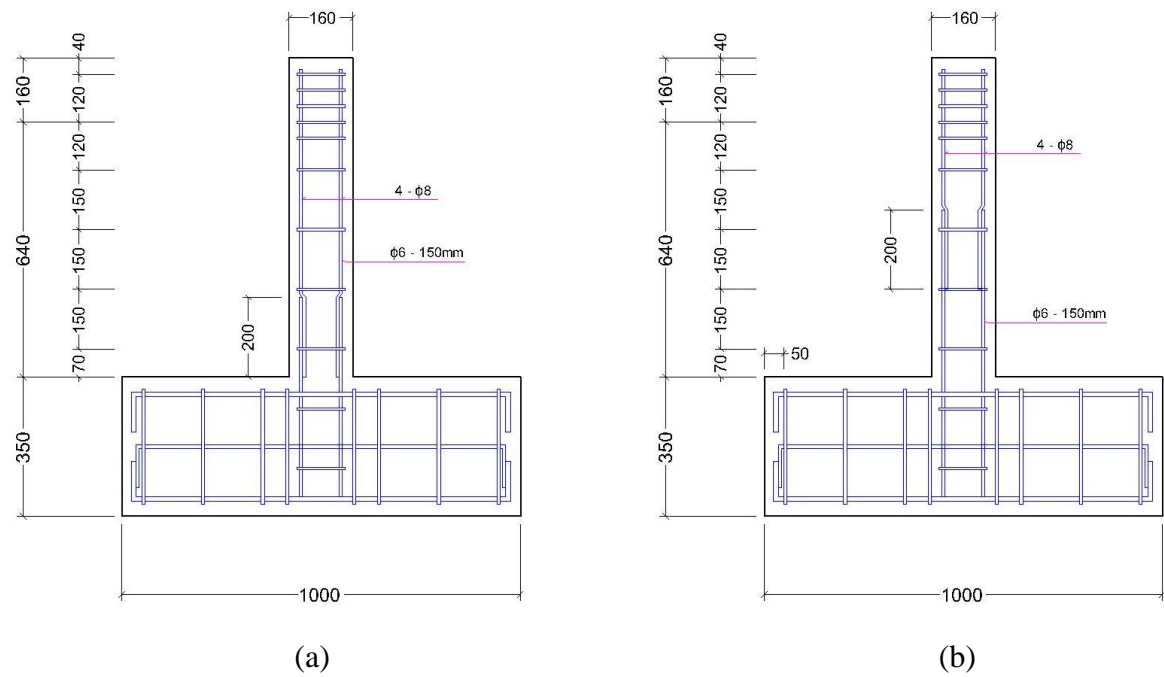
Gambar 3.1 Penampang benda uji kolom



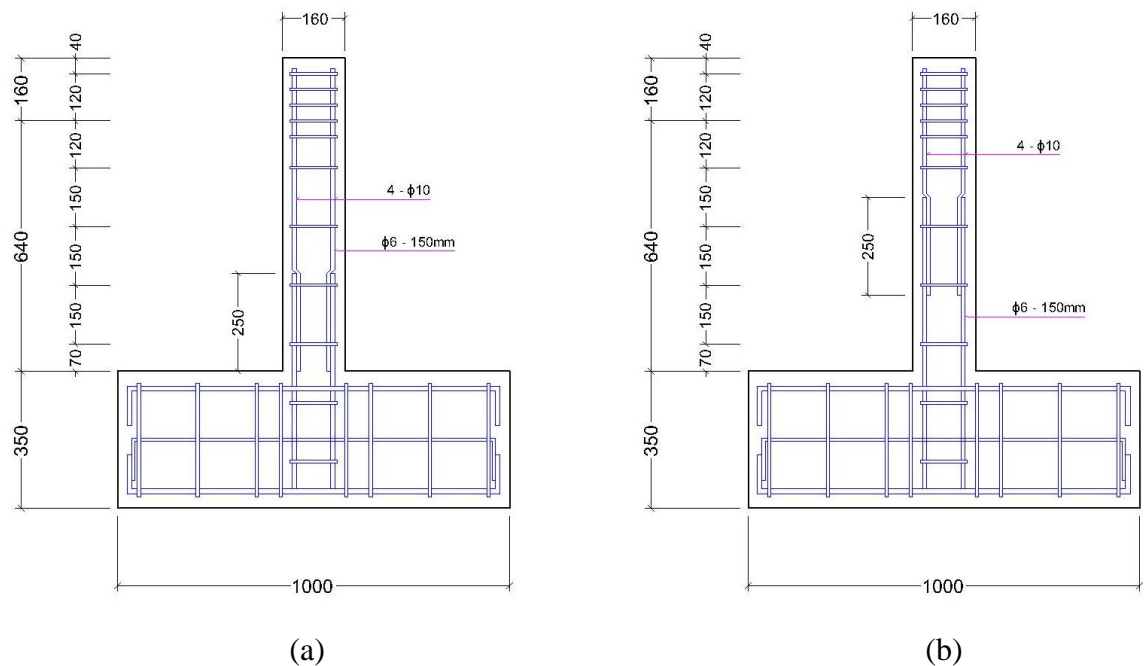
Gambar 3.2 (a) Benda uji kolom L15C; (b) Benda Uji kolom L25C



Gambar 3.3 (a) Benda uji kolom M15C; (b) Benda Uji kolom M25C



Gambar 3.4 (a) Benda uji kolom L15SB; (b) Benda Uji kolom L15SM



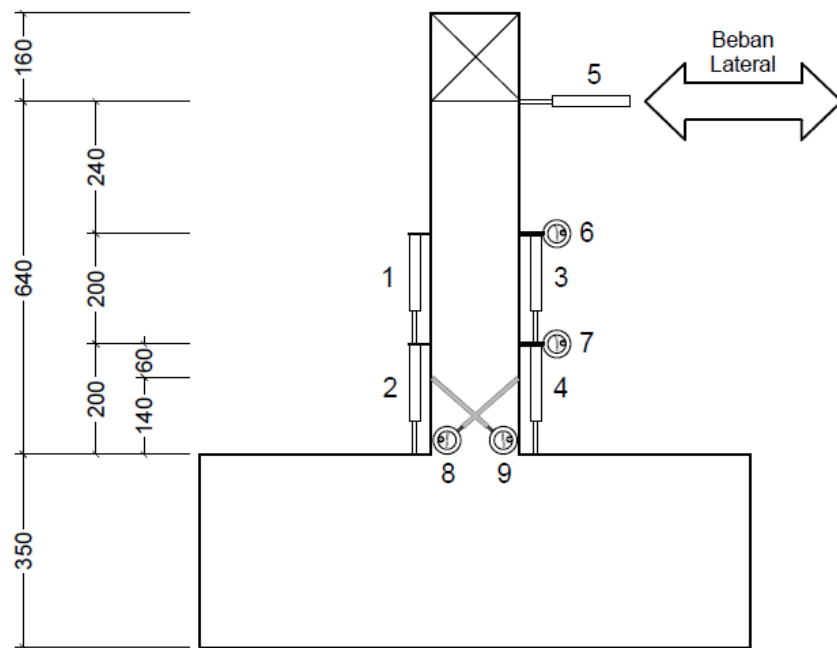
Gambar 3.5 (a) Benda uji kolom M15SB; (b) Benda Uji kolom M15SM

3.3 Instrumen Penelitian

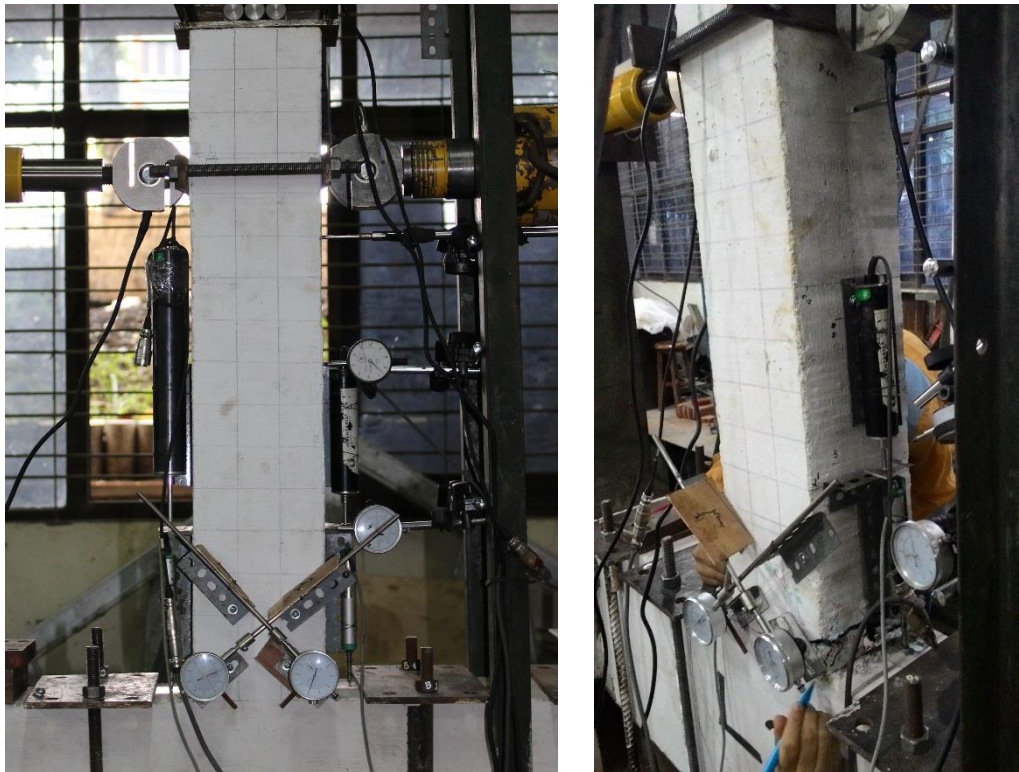
Kapasitas lateral, kapasitas *drift* dan kontribusi masing-masing komponen perpindahan lateral (lentur, geser dan penetrasi leleh) di tiap penambahan siklus perlu untuk diketahui agar tujuan yang dijabarkan pada bab 1 dapat tercapai. Tiga set *hydraulic jack* digunakan sebagai beban aksial dan beban lateral (*push* dan *pull*) pada spesimen kolom. Sebuah *load cell* dipasang di masing-masing *hydraulic jack* untuk mengukur besarnya beban aksial dan lateral.

Komponen perpindahan diukur menggunakan lima *linear variable displacement transducers* (LVDTs) dan 4 *dial gauges* seperti terlihat pada gambar 3.6, dengan susunan sebagai berikut:

- 1 LVDT dan 2 *dial gauges* (nomor 5,6 dan 7) untuk mengukur perpindahan lateral total
- 4 LVDT (nomor 1 s/d 4) untuk mengukur perpindahan lentur
- 2 *dial gauges* (nomor 8 dan 9) untuk mengukur perpindahan geser



Gambar 3.6 Layout LVDT dan dial gauge



Gambar 3.7 LVDT dan dial gauge yang telah dipasang pada spesimen

3.4 Pengukuran Komponen Perpindahan Lateral

Perpindahan lateral kolom merupakan total dari tiga komponen perpindahan, yaitu perpindahan lentur, geser dan penetrasi leleh. Dalam studi ini, perpindahan lentur dan geser diukur menggunakan LVDTs dan *dial gauges* sedangkan perpindahan penetrasi leleh dihitung secara praktis dengan mengurangi perpindahan lateral total dengan jumlah dari perpindahan lentur dan geser.

3.4.1 Perpindahan Lentur

Perpindahan lateral kolom akibat lentur dapat dihitung dengan mengintegrasikan kurvatur lentur di sepanjang tinggi komponen.

$$\Delta_{flexure} = \int_0^L \phi \, dx = \frac{\delta_2 - \delta_1}{L_h} L_{v1} \quad (3.1)$$

Dua segmen paling bawah, dimana kerusakan kolom diprediksi paling parah, dipasang LVDT dan perpindahan lateral akibat lentur dihitung menggunakan rumus 3.1. Segmen paling atas tidak akan mengalami retak yang signifikan sehingga perpindahan lentur dapat secara konservatif dihitung dengan prinsip elastis.

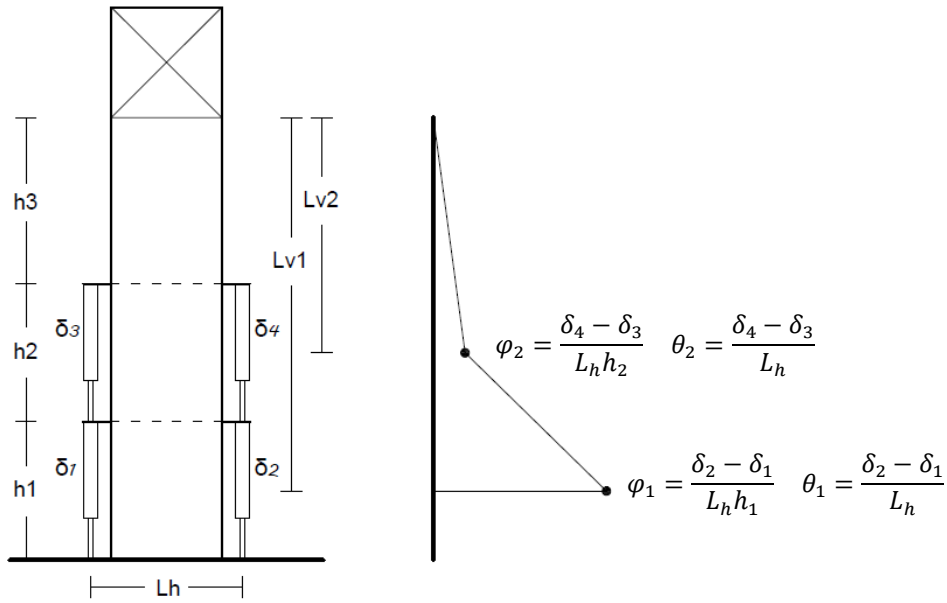
$$\Delta_{flexure} = \frac{\phi h_3^2}{3} = \frac{V h_3^3}{3 E_c I} \quad (3.2)$$

Dimana:

V = beban lateral

E_c = modulus elastis beton

I = momen inersia

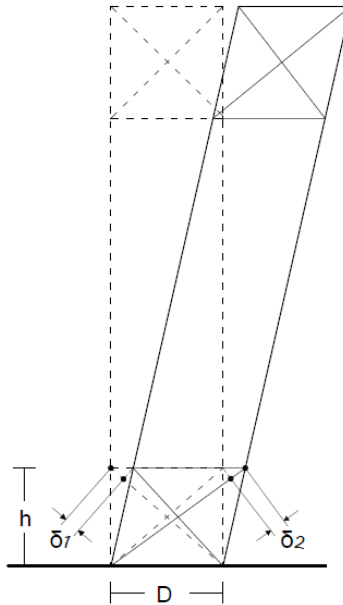


Gambar 3.8 Perhitungan kurvatur dan rotasi untuk perpindahan lentur

3.4.2 Perpindahan Geser

Perpindahan geser diukur menggunakan *dial gauges* yang dipasang diagonal dan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta_{shear} = \frac{(\delta_2 + \delta_1)}{2} \sec \alpha = \frac{(\delta_2 + \delta_1)}{2} \frac{\sqrt{h^2 + D^2}}{h} \quad (3.3)$$

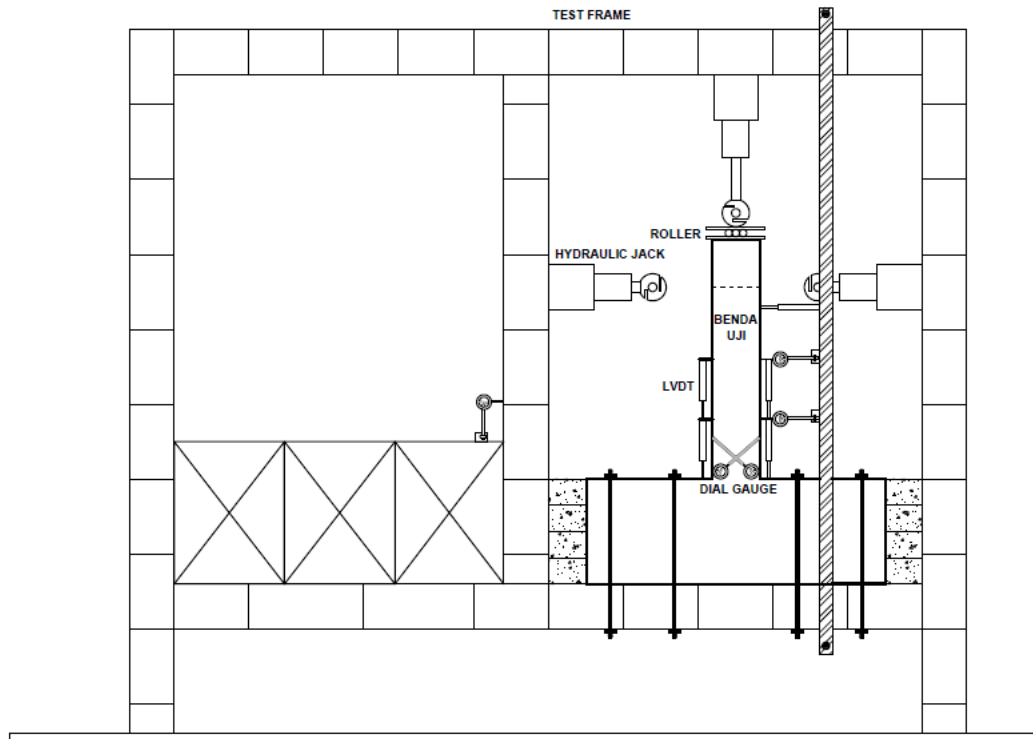


Gambar 3.9 Perhitungan perpindahan geser menggunakan *dial gauge*

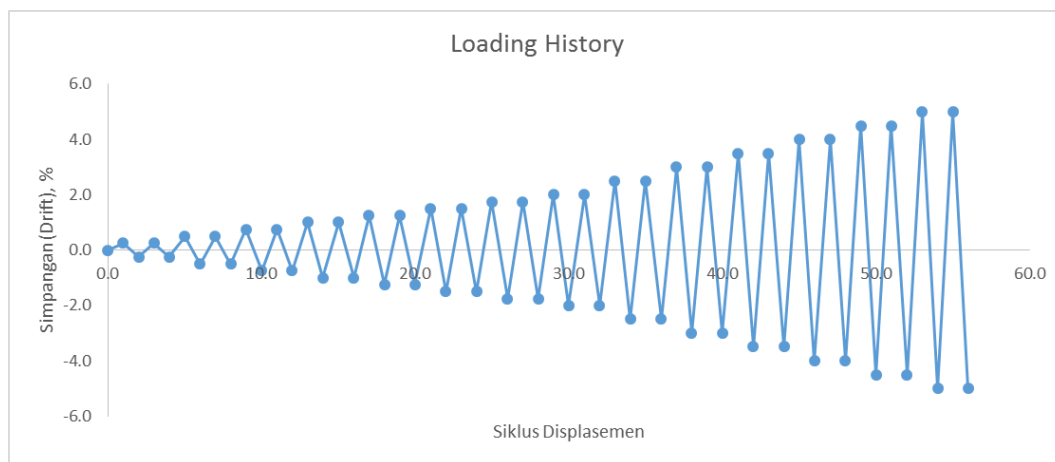
3.5 Prosedur Pengujian

Semua spesimen diberikan beban aksial yang dijaga agar kurang lebih konstan sepanjang pengujian dan beban lateral siklik. Karena keterbatasan alat, *hydraulic jack* sebagai beban aksial tidak bisa selalu berada tepat di tengah kolom sehingga menimbulkan adanya eksentrisitas. Namun dalam studi ini, momen tambahan akibat eksentrisitas beban aksial diabaikan karena nilai eksentrisitas yang kecil. *Roller* berfungsi untuk menjaga *hydraulic jack* tetap berada di tempatnya dan tidak terlepas dari *frame* seiring peningkatan siklus simpangan kolom. *Hydraulic jack* yang dipasang horizontal berlaku sebagai beban lateral bolak-balik. Tiap siklus memiliki empat kali pembacaan data, data pertama yaitu saat *hydraulic jack* sebelah kiri didorong (*push*), data kedua saat *hydraulic jack* sebelah kiri ditarik kembali sehingga beban lateral dan simpangan pada kolom bernilai nol (kolom kembali ke keadaan semula sebelum pemberian beban), data ketiga saat *hydraulic jack* sebelah kanan didorong (*pull*) dan data keempat saat *hydraulic jack* sebelah kanan ditarik kembali.

Beban lateral ditambahkan secara bertahap secara *displacement control*. Rangkaian pembebanan terdiri dari dua siklus pada tiap pertambahan perpindahan lateral. Pada tahap awal, beban ditambahkan dengan kenaikan *drift* 0,25% hingga *drift* mencapai 2%. Tujuannya agar didapat data yang halus pada kondisi pra-puncak, yaitu sebelum kolom kehilangan kapasitas lateralnya. *Drift* kemudian dinaikkan menjadi 0,5% tiap penambahan siklus untuk mengamati degradasi kekuatan lateral pada kolom. Proses penambahan siklus terus dilakukan hingga beban lateral kolom turun hingga 80% beban lateral puncak. Rangkaian pembebanan ini mengacu pada penelitian pendahuluan oleh Wibowo dkk. (2010).



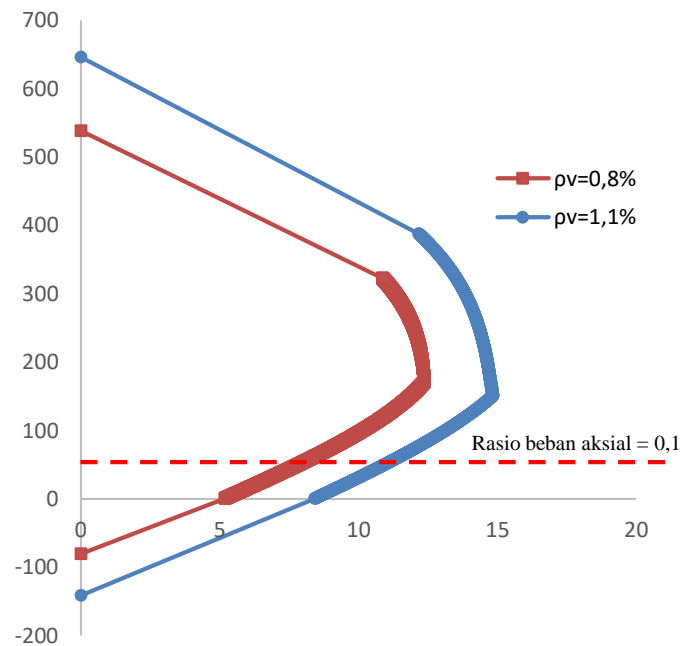
Gambar 3.10 Setting up pengujian



Gambar 3.11 *Quasi-static lateral loading history*

Kapasitas kolom di tiap kondisi (retak, leleh, puncak dan *spalling* selimut beton) telah dprediksi sebelum pengujian dilakukan. Kapasitas momen lentur dihitung menggunakan program analisa momen-kurvatur, sedangkan kapasitas geser dihitung berdasarkan SNI 03-2847-2002 mengenai kapasitas geser untuk kolom dengan beban aksial tekan. Hasil perhitungan terlampir dalam tabel 3.5.

Beban aksial bernilai 10% dari kapasitas tekan aksial kolom ($0,1 A_g f'_c$). Berdasarkan Wibowo et. al. (2012), rasio beban aksial 0,4 atau 40% berada kira-kira pada titik seimbang (*balance point*) dari diagram interaksi. Rasio beban aksial 0,1 berarti kolom didesain untuk mengalami keruntuhan tarik yang diawali dengan lelehnya tulangan longitudinal.



Gambar 3.12 Diagram interaksi spesimen kolom

3.6 Hipotesa Pengujian

Perilaku utama yang ingin diketahui dalam studi ini adalah kapasitas lateral, kapasitas *drift*, kontribusi komponen perpindahan lateral (lentur, geser dan penetrasi leleh) serta mekanisme kegagalan spesimen kolom. Desain parameter spesimen kolom ditentukan berdasarkan dari prediksi perilaku kolom tersebut di bawah beban aksial dan lateral siklik. Secara ringkas, prediksi perilaku spesimen kolom adalah sebagai berikut.

- Peningkatan rasio tulangan longitudinal meningkatkan kapasitas lateral kolom dan mereduksi kapasitas *drift* kegagalan lateral.
- Peningkatan rasio volume tulangan transversal meningkatkan kapasitas *drift* kegagalan lateral (meningkatkan daktilitas) namun tidak mempengaruhi kapasitas lateral kolom.

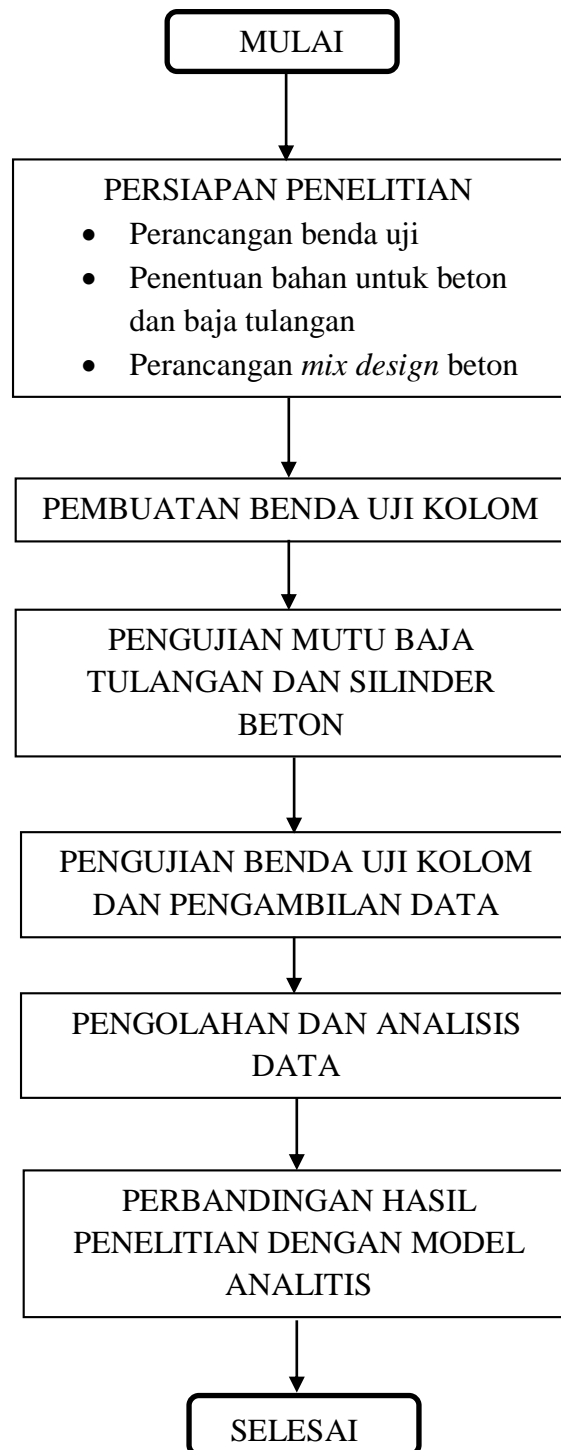
- c. Penempatan sambungan lewatan tulangan longitudinal di luar daerah kritis menggeser area kerusakan kolom (area sendi plastis) menjauhi titik momen terbesar di dasar kolom.
- d. Penempatan sambungan lewatan tulangan longitudinal di daerah kritis menyebabkan kolom tidak mampu mencapai kapasitas lentur nominalnya dan hanya mampu bertahan hingga 60% sampai dengan 80% dari kapasitas momen nominal.
- e. Mekanisme keruntuhan untuk semua kolom adalah *flexure-shear critical*, dimana kolom mampu leleh di lentur namun gagal di geser pada tingkat daktilitas yang lebih tinggi.

Tabel 3.5 Beban aksial, kapasitas momen, kapasitas lateral dan kapasitas geser tiap spesimen

Parameter		Satuan	L15C	L25C	M15C	M25C	L15SB	L15SM	M15SB	M15SM
Parameter desain	f'_c	MPa	22.5	22.6	26.9	21.9	25.2	22.1	25.4	25.2
	ρ_v	%	0,8	0,8	1,1	1,1	0,8	0,8	1,1	1,1
	ρ_h (volumetric)	%	0,61	0,36	0,61	0,36	0,61	0,61	0,61	0,61
Beban aksial	P_{aksial}	kN	54.36	54.36	60.24	60.24	52.44	52.44	60.24	60.24
Kapasitas momen	M_{cr}	kNm	6.95	6.94	8.07	7.49	7.05	6.76	7.87	7.87
	M_y	kNm	19.23	19.19	28.10	27.42	19.18	18.93	27.90	27.90
	M_{ult}	kNm	20.28	20.06	28.87	27.86	20.60	20.00	28.57	28.57
	M_{spall}	kNm	17.67	17.53	24.88	24.05	17.75	17.46	24.58	24.58
Beban lateral	V_{cr}	kN	4.45	4.44	5.16	4.80	4.51	4.33	5.03	5.03
	V_y	kN	12.31	12.28	17.98	17.55	12.27	12.12	17.86	17.86
	V_{ult}	kN	12.98	12.84	18.48	17.83	13.18	12.80	18.28	18.28
	V_{spall}	kN	11.31	11.22	15.92	15.39	11.36	11.18	15.73	15.73
Kapasitas Geser	V_c	kN	16.96	16.97	19.76	19.03	17.06	16.64	19.55	19.53
	V_s	kN	18.56	11.14	18.56	11.14	18.56	18.56	18.56	18.56
	V_u	kN	35.53	28.11	38.33	30.17	35.62	35.21	38.12	38.09

3.6 Diagram Alir Penelitian

Rangkaian penelitian pada studi ini secara ringkas tersaji dalam diagram alir penelitian sebagai berikut (gambar 3.12).



Gambar 3.13 Diagram alir penelitian

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Properti Material

Pengujian properti material dilakukan sebelum benda uji atau spesimen kolom dibuat. Pengujian properti material meliputi uji tekan beton dan uji tarik baja.

4.1.1 Uji Tekan Beton

Pembuatan beton dilakukan secara mandiri oleh peneliti dengan kuat tekan beton rencana sebesar 20 MPa. Pengukuran kekuatan beton dilakukan menggunakan dua metode, yaitu uji tekan silinder beton (*concrete compressive cylinder test*) dan *hammer test*, namun hasil kekuatan tekan beton yang diambil adalah dari hasil uji tekan silinder beton. Perawatan (*curing*) silinder beton dengan cara perendaman selama 28 hari, sedangkan pengujian silinder beton dilakukan dalam waktu yang bervariasi, yaitu sehari sebelum pengujian spesimen (tabel 4.1). Hasil uji tekan silinder beton dan *hammer test* menunjukkan semua spesimen memiliki kuat tekan beton yang lebih besar dari kuat tekan beton rencana, seperti terlihat dalam tabel 4.1 hingga 4.3.



Gambar 4.1 Uji tekan silinder beton

Tabel 4.1 Hasil uji tekan silinder beton

Kolom	Umur Uji (hari)	Beban Tekan (kN)	Kuat Tekan (MPa)
L15C	65	380	22.55
L25C	65	409	22.60
M15C	61	467	26.87
M25C	64	355	21.91
L15SB	48	422	25.19
L15SM	48	365	22.06
M15SB	64	454	25.37
M15SM	62	432	25.21

Tabel 4.2 Hasil uji hammer spesimen kolom dengan variabel jarak sengkang

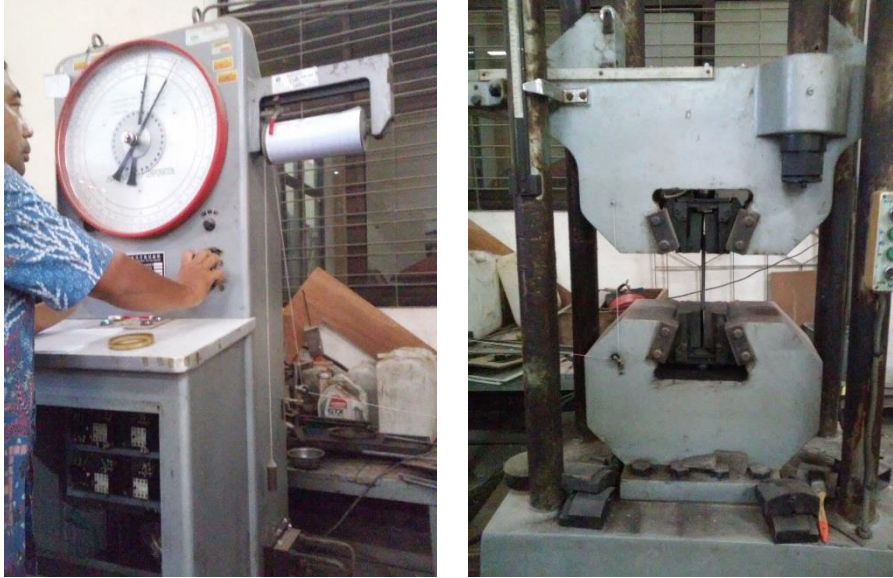
Titik Tembakan ke-	Nilai Lenteng Palu Beton			
	L15C	L25C	M15C	M25C
1	32	30	30	34
2	25	30	30	30
3	33	28	36	29
4	30	27	30	27
5	31	30	38	28
6	30	27	34	30
7	28	31	32	31
8	30	26	32	29
9	29	29	32	32
10	30	28	32	29
Nilai rerata	29.80	28.60	32.60	29.90
Perkiraan kuat tekan beton terkoreksi (kubus) (kg/cm ²)	284.30	265.66	329.12	285.87
Kekuatan beton (MPa)	23.60	22.05	27.32	23.73

Tabel 4.3 Hasil uji *hammer* spesimen kolom dengan variabel *lap splice*

Titik Tembakan ke-	Nilai Lenteng Palu Beton			
	L15SB	L15SM	M15SB	M15SM
1	33	31	31	31
2	28	30	30	33
3	34	30	30	30
4	33	28	31	31
5	32	30	32	32
6	32	29	29	36
7	34	31	33	29
8	32	30	31	32
9	31	29	31	31
10	31	29	31	31
Nilai rerata	32.00	29.70	30.90	31.60
Perkiraan kuat tekan beton terkoreksi (kubus) (kg/cm ²)	319.36	282.73	301.69	312.90
Kekuatan beton (MPa)	26.51	23.47	25.04	25.97

4.1.2 Uji Tarik Tulangan Baja

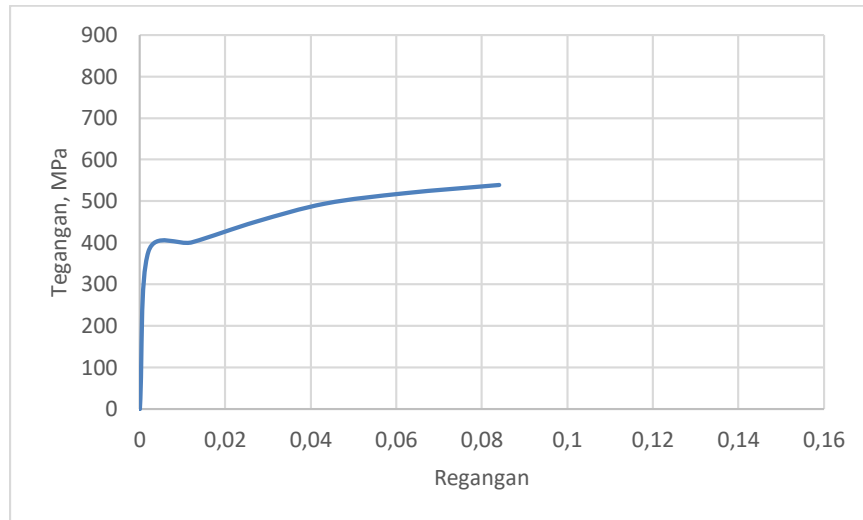
Uji tarik baja dilakukan pada tulangan baja polos dengan diameter 6 mm (senggang), 8mm dan 10 mm (tulangan longitudinal) untuk mengetahui nilai kuat tarik leleh, kuat tarik ultimit dan modulus elastisitas dari masing-masing tulangan baja. Dari hasil kurva tegangan-regangan tulangan baja (gambar 4.3 s/d 4.5) terlihat tulangan $\phi 6$ mm memiliki kuat leleh paling rendah, yaitu 378 MPa, disusul kemudian dengan tulangan diameter $\phi 8$ mm (444 MPa) dan $\phi 10$ mm (538 MPa). Hasil modulus elastisitas juga bervariasi seperti terlihat dalam tabel 4.4.



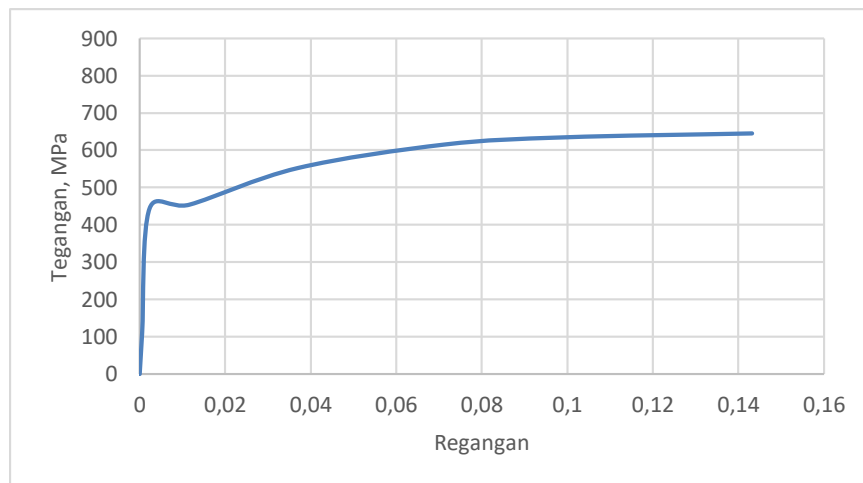
Gambar 4.2 Uji tarik tulangan baja

Tabel 4.4 Parameter material tulangan longitudinal

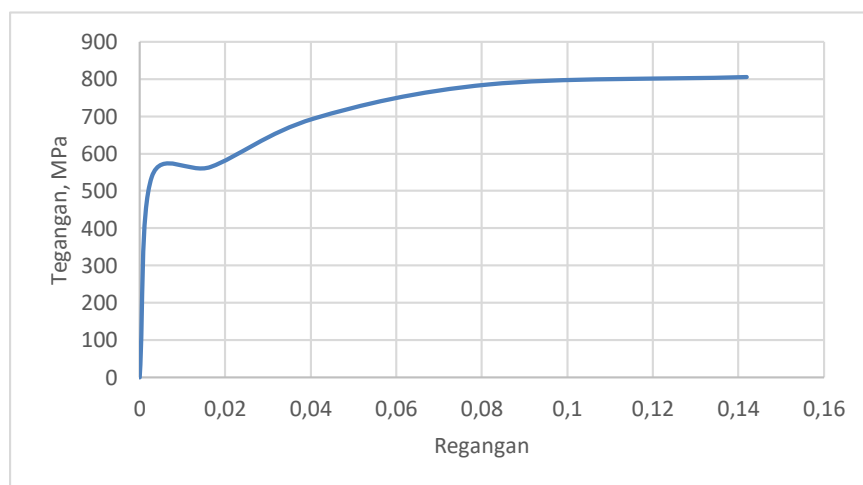
Tulangan	Diameter Aktual	f_y	f_u	E
	(mm)	(MPa)	(MPa)	MPa
$\phi 6$	5.92	378	538	190173
$\phi 8$	7.61	433	646	203613
$\phi 10$	9.15	536	824	201118



Gambar 4.3 Kurva tegangan-regangan tulangan $\phi 6$ mm



Gambar 4.4 Kurva tegangan-regangan tulangan $\phi 8$ mm



Gambar 4.5 Kurva tegangan-regangan tulangan $\phi 10$ mm

4.2 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji kolom dimulai dengan merangkai tulangan kolom sesuai dengan desain (gambar 3.1 s/d 3.5). Tulangan pondasi dirangkai terlebih dahulu lalu disambungkan ke dalam rangkaian pondasi dengan panjang penyaluran (*development length*) sepanjang tinggi pondasi untuk mencegah terjadinya *slip*. Bagian dasar tulangan longitudinal kolom dibengkokkan sebagai jangkar untuk mengikat rangkaian tulangan kolom dengan rangkaian tulangan pondasi. Sengkang dibengkokkan dengan sudut 135^0 di bagian sudut dan diikat ke tulangan longitudinal menggunakan kawat baja.

Rangkaian tulangan kolom dan pondasi kemudian dimasukkan ke dalam bekisting dan dicor secara horizontal (gambar 4.6). Pengecoran dilakukan sebanyak dua spesimen dalam satu hari. Karena keterbatasan kapasitas molen, satu spesimen kolom membutuhkan dua kali pengadukan sehingga mutu pondasi dan balok berbeda. Bekisting dibuka sekitar 24 jam setelah pengecoran. Kolom beton dirawat (*cured*) dengan karung goni basah hingga sehari sebelum pengujian dilakukan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 (a) Rangkaian tulangan benda uji; (b) Benda uji dipasangkan kedalam bekisting; (c) Pengecoran benda uji

4.3 Perilaku Spesimen Kolom

4.3.1 Spesimen Kolom L15C

Spesimen kolom L15C memiliki tulangan longitudinal yang menerus dengan rasio 0.8% dan jarak antar sengkang 150 cm. Spesimen kolom menerima beban aksial konstan sebesar 54.4 kN ($0,10 f'_c A_g$) dan penambahan *drift* secara siklik sebesar 0.25% hingga mencapai *drift* 2.0% kemudian dinaikkan menjadi penambahan *drift* 0.5% tiap siklus hingga kegagalan lateral.

Retak awal berupa retak horizontal pada bagian dasar kolom, yaitu pada tempat dimana momen bernilai maksimum, dan pada grid kedua (71.7 mm) dari dasar kolom sehingga retak masih beada di dalam area sendi plastis. Retak awal terjadi pada *drift* 0.50% dan pada taraf beban lateral 11.16 kN yang jauh lebih besar dari perhitungan analitis sebesar 4.45 kN.

Retak tidak berkembang secara signifikan hingga *drift* leleh 0.71%. Pada taraf ini retak horizontal memanjang hingga retak dari kedua sisi kolom menyatu di tengah kolom, namun retak masih terkonsentrasi pada area sendi plastis kolom. Beban lateral leleh tercatat sebesar 12.44 kN dan sesuai dengan hasil perhitungan analitis sebesar 12.31 kN. Pada *drift* 0.75% timbul retak lentur di luar area sendi plastis, yaitu pada grid kelima (211 mm) dari dasar kolom (gambar 4.8 b). Area sendi plastis diasumsikan berada di sepanjang 140 mm dari muka kolom.

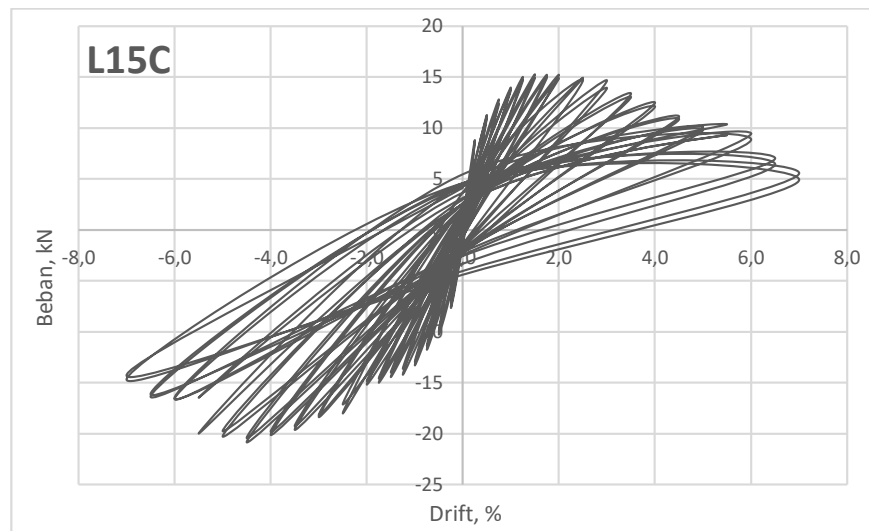
Retak-retak halus (*hairline cracks*) mulai bertambah di sekitar dua retak horizontal utama yang juga semakin bertambah lebar seiring semakin meningkatnya siklus *drift*. Retak lentur di grid kelima berkembang menjadi retak geser pada *drift* 1.0%, namun retak tersebut tidak berkembang lebih lanjut. Seperti terlihat pada kurva histeresis beban-*drift* (gambar 4.7), kapasitas lateral puncak tercapai pada *drift* 1.75% dengan beban lateral puncak 15.2 kN. Nilai kapasitas lateral puncak pada hasil eksperimen relatif lebih tinggi dari hasil perhitungan analitis sebesar 12.98 kN.

Kegagalan lateral spesimen kolom terjadi di *drift* 4.0% dengan beban lateral 12.29 kN, yaitu 80% dari kapasitas lateral puncak. Perbandingan hasil eksperimen dengan hasil perhitungan analitis menggunakan analisa momen-kurvatur dapat dilihat pada tabel 4.5. Retak lentur pada grid kedua berkembang menjadi retak miring (*inclined crack*) di *drift* 3.0% yang pada akhirnya bergabung dengan

crushing concrete ujung dasar kolom dan retak vertikal searah tulangan longitudinal di zona tekan kolom. Bukaan retak yang cukup lebar terjadi pada retak horizontal di dasar kolom diikuti dengan *spalling* selimut beton, menandakan telah terjadi *slip* tulangan longitudinal. Ujung dasar kolom mulai mengalami *crushing* akibat simpangan lateral kolom yang cukup tinggi di *drift* 6.0%. *Spalling* semakin meluas pada daerah sendi plastis hingga observasi dihentikan pada *drift* 7.0%.

Spesimen kolom mengalami retak utama di tiga tempat, yaitu di dasar kolom, di grid kedua (71.7 mm) dan grid keempat (211 mm). Bagian dasar kolom (*beam-column interface*) merupakan titik dimana diperkirakan terdapat tegangan lentur terbesar, sedangkan pada jarak 70 mm terdapat sengkang pertama pada kolom dan pada jarak 220 mm terdapat sengkang kedua pada kolom. Retak terpusat sekitar separuh area sendi plastis.

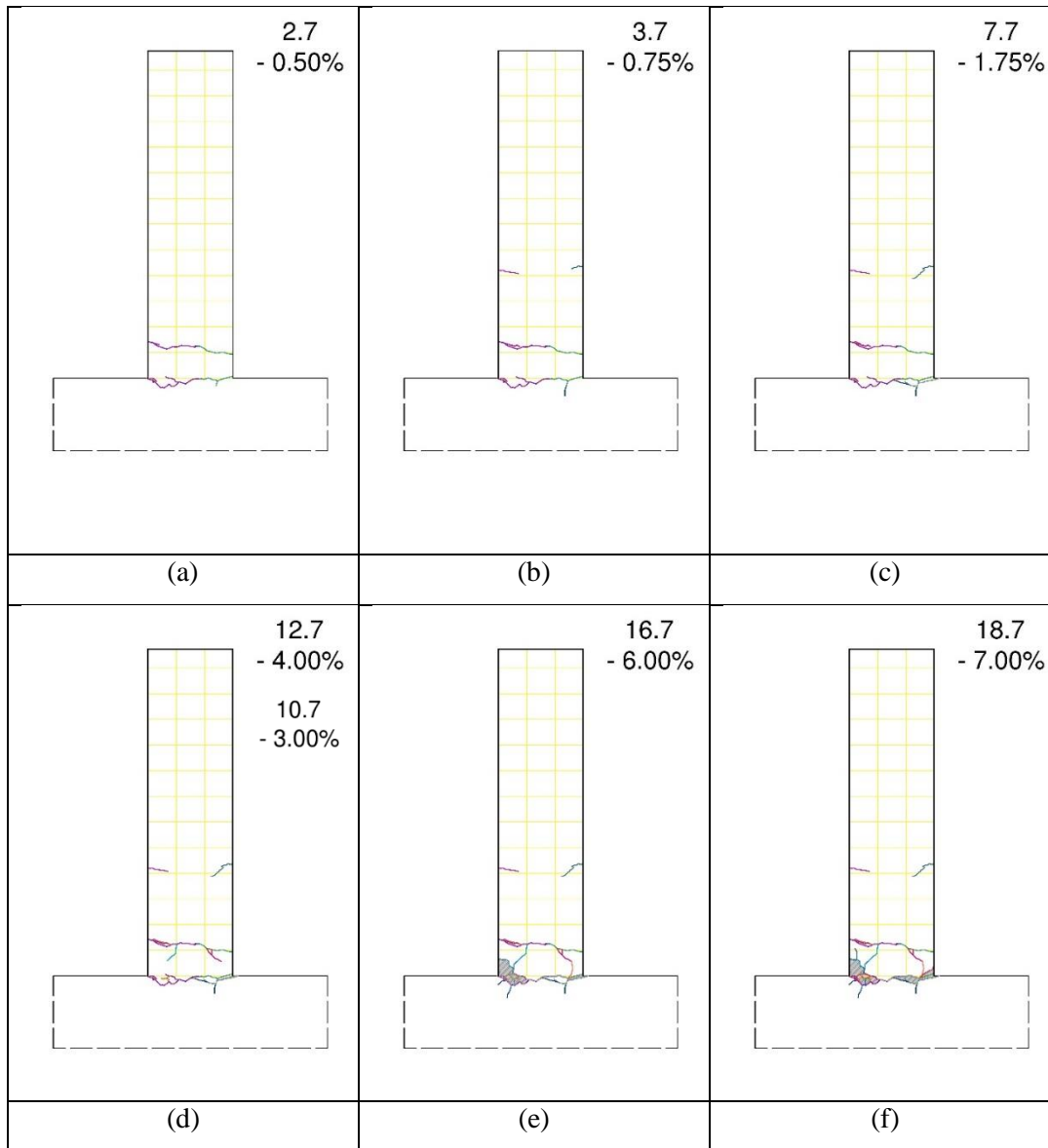
Kurva histeresis spesimen L15C (gambar 4.7) memperlihatkan degradasi kekuatan yang cukup signifikan seiring peningkatan deformasi yang diberikan. Namun kolom memiliki kapasitas simpangan yang cukup baik, kolom masih dapat mempertahankan kapasitas aksialnya hingga simpangan yang cukup besar (*drift* 7.0% atau 44.8 mm).

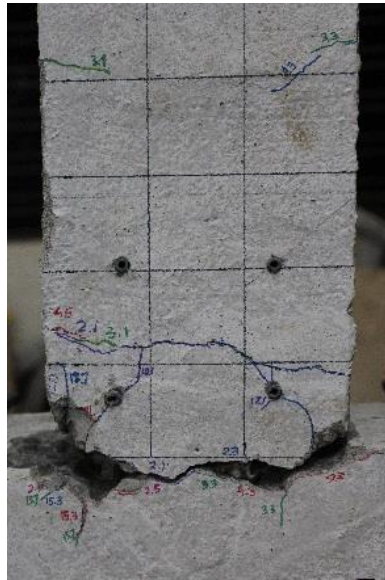


Gambar 4.7 Kurva histeresis spesimen L15C

Tabel 4.5 Kapasitas dan *drift* spesimen L15C

L15C	Kapasitas (kN)				Drift (%)			
	F_{cr}	F_y	F_u	F_{lf}	δ_{cr}	δ_y	δ_u	δ_{lf}
Eksperimen	11.16	12.44	15.20	12.29	0.50	0.72	1.75	4
Teoritis	4.45	12.31	12.98	-	0.08	0.60	1.73	-

**Gambar 4.8** Kerusakan pada spesimen kolom L15C di berbagai peningkatan *drift*



Tampak depan



Tampak samping kanan



Tampak belakang



Tampak samping kiri

Gambar 4.9 Tampak spesimen kolom 2L15C pada akhir pengujian (*drift* 7.0%)

4.3.2 Spesimen Kolom L25C

Spesimen kolom L25C yang memiliki jarak antar sengkang 250 mm dikenakan perlakuan yang sama dengan kolom L15C untuk melihat perbedaan perilaku kolom apabila jarak antar sengkang diperpanjang. Secara teoritis, peningkatan jarak sengkang tidak akan mempengaruhi kapasitas lentur kolom, namun akan berpengaruh terhadap daktilitas kolom. Peneliti menguji dua spesimen L25C yang memiliki variabel yang sama untuk memastikan kredibilitas hasil pengujian. Hasil pengujian menunjukkan kedua spesimen kolom, L25C(1) dan L25C(2), gagal secara lentur namun telah menunjukkan adanya perilaku geser yang lebih terlihat dibandingkan dengan spesimen L15C. Untuk pembahasan selanjutnya, digunakan hasil pengujian spesimen L25C(2) karena hasil perpindahan geser spesimen L15C(1) tidak beraturan.

4.2.2.1 Spesimen Kolom L25C(2)

Pada spesimen kolom L25C(2), retak awal berupa retak horizontal pada grid kedua (79.1 mm) dari dasar kolom dan retak miring pada ujung sambungan balok-kolom. Retak miring yang memanjang ke arah balok diperkirakan terjadi akibat perbedaan mutu beton antara balok dan kolom, dimana mutu beton balok lebih rendah. Retak awal terjadi pada *drift* 0.50% dan beban lateral 10.12 kN, hampir dua kali lipat dari perhitungan teoritis yaitu 4.44 kN.

Retak lentur horizontal pada grid kedua terus memanjang hingga *yield drift* 0.75% dan mulai terlihat berkembang menjadi retak miring. Retak lentur juga mulai terbentuk di dasar kolom. Fase leleh kolom tercapai pada beban lateral 12.02 kN dan hampir mendekati hasil perhitungan teoritis sebesar 12.84 kN.

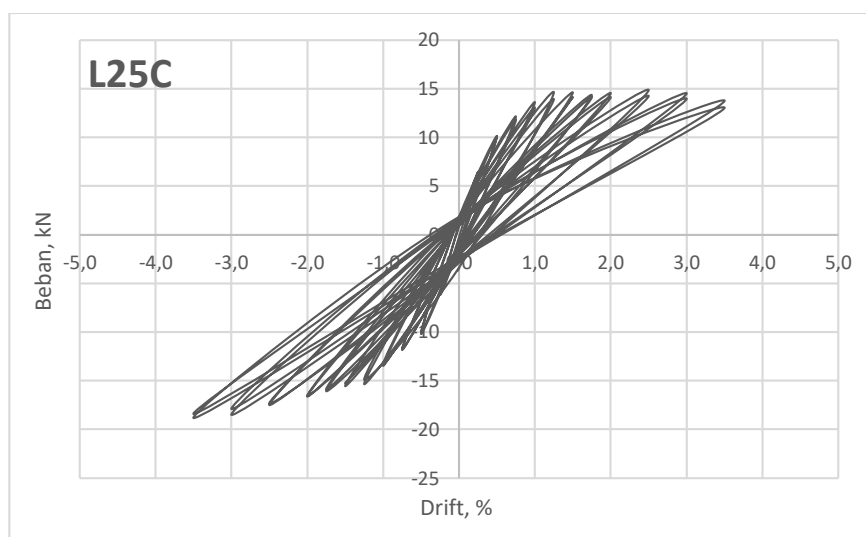
Hal yang menarik adalah kapasitas ultimit kolom baru tercapai pada *drift* 2.50%, menunjukkan daktilitas ultimit yang lebih tinggi dari spesimen kolom L15C. Beban lateral puncak relatif mendekati beban lateral puncak kolom L15C, yaitu 14.57 kN. Hasil ini sesuai dengan prediksi awal dimana penambahan jarak sengkang hanya akan berpengaruh secara signifikan pada daktilitas kolom dan hampir tidak mempengaruhi kapasitas lentur kolom. Perkembangan retak lebih terkonsentrasi di dasar kolom, dimana retak horizontal dari kedua sisi kolom

memanjang dan akhirnya menyatu. Bukaan retak yang cukup lebar juga terlihat di dasar kolom pada kondisi beban puncak.

Retak lentur pada grid kedua, dimana juga terdapat sengkang pertama pada kolom, menunjukkan akan berkembang menjadi retak geser namun retak ini tidak berkembang lebih lanjut setelah melewati *drift* 1.25%. Pada akhir pengujian di *drift* 3.0%, tampak retak di grid kedua melebar dan mengalami bukaan, sama seperti bukaan pada retak lentur di dasar kolom.

Pengujian hanya dapat dilakukan hingga *drift* 3.0% akibat melesetnya *hydraulic jack* dari *frame* pengujian. Hingga akhir pengujian, retak didominasi oleh retak lentur pada grid kedua dan dasar kolom yang masih berada dalam area sendi plastis. Perilaku geser belum terlihat pada spesimen kolom, menandakan belum terjadinya degradasi kekuatan geser kolom pada saat puncak kekuatan lentur kolom tercapai.

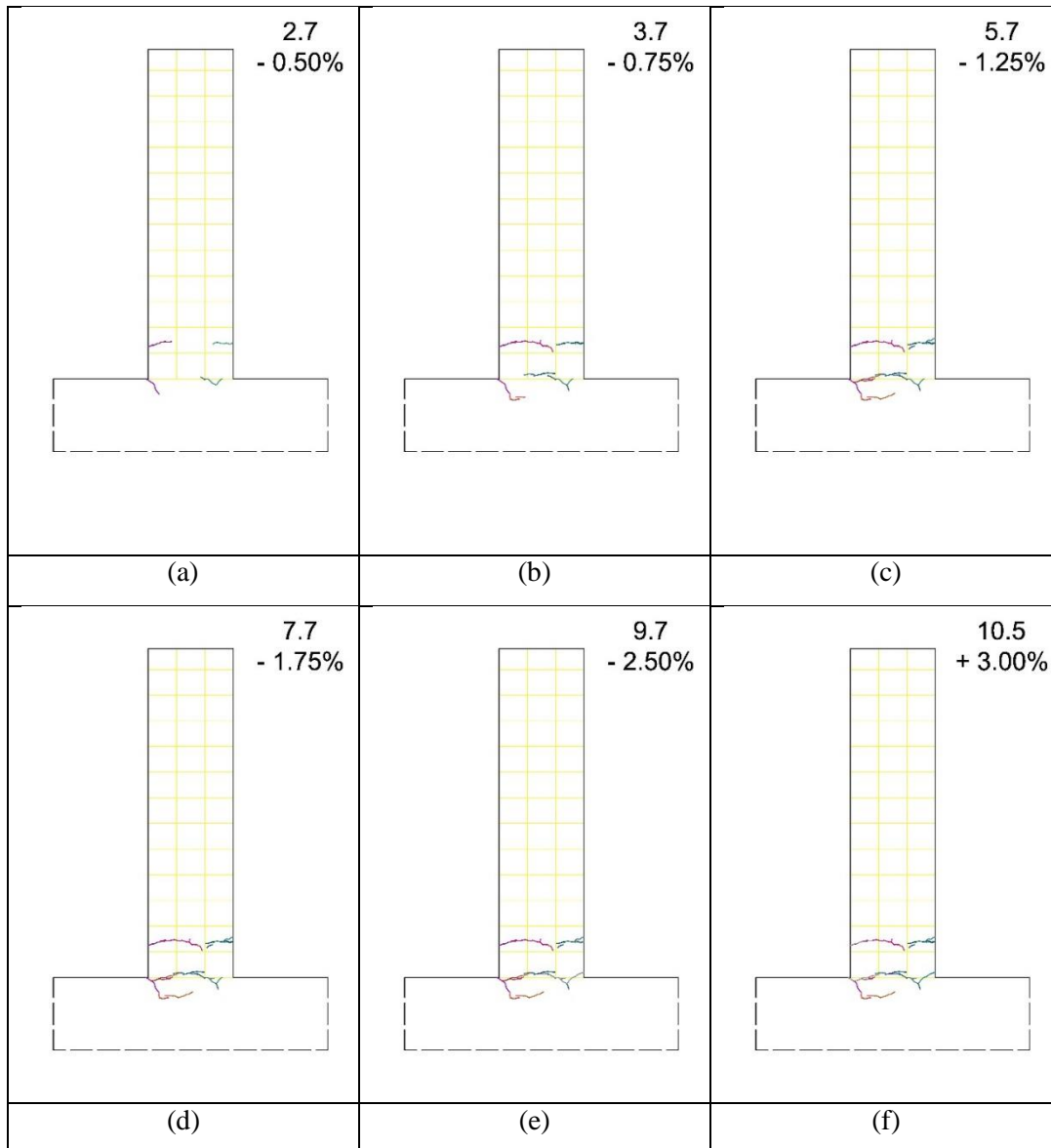
Meskipun kondisi keruntuhan lateral tidak didapat, namun diprediksi spesimen L25C(2) akan mengalami kegagalan lebih cepat (*column deteriorate faster*) setelah mencapai kondisi ultimit. Spesimen L25C(2) mengalami penurunan beban yang lebih cepat dibandingkan spesimen L15C. Spesimen L15C membutuhkan 3 siklus peningkatan *drift* untuk menurunkan beban lateral puncak sebesar 6% sedangkan beban lateral spesimen L25C(2) turun 8% hanya dalam 1 siklus.



Gambar 4.10 Kurva histeresis spesimen L25C

Tabel 4.6 Kapasitas dan *drift* spesimen L25C

L25C	Kapasitas (kN)				Drift (%)			
	F_{cr}	F_y	F_u	F_{lf}	δ_{cr}	δ_y	δ_u	δ_{lf}
Eksperimen	10.12	12.02	14.57	-	0.50	0.77	2.50	-
Teoritis	4.44	12.28	12.84	-	0.08	0.61	1.19	-

**Gambar 4.11** Kerusakan pada spesimen kolom L25C di berbagai peningkatan *drift*

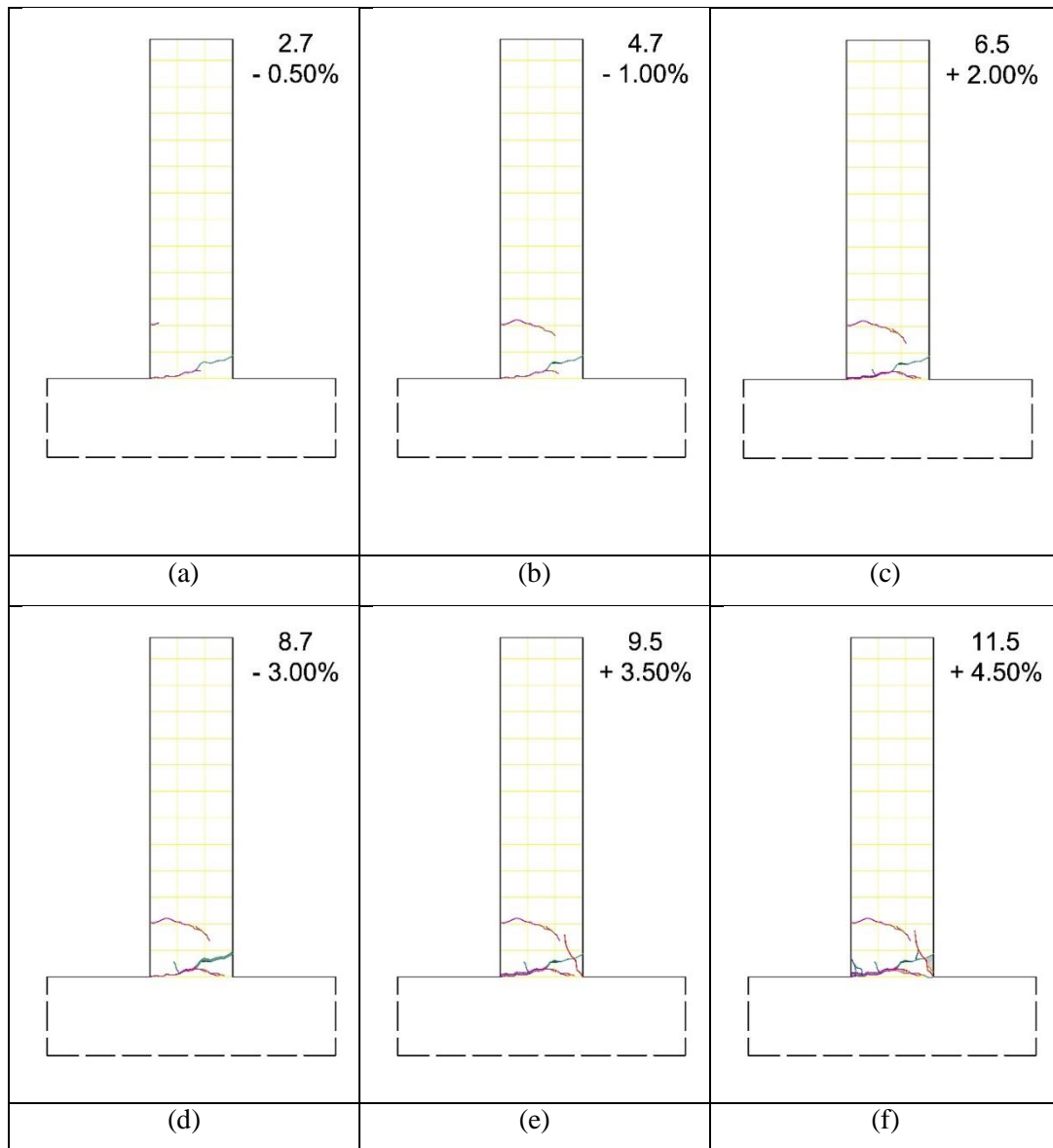
4.2.2.2 Spesimen Kolom L25C(1)

Perilaku geser dapat lebih terlihat pada spesimen L25C(1), dimana pengujian masih dapat berlanjut hingga *drift* 4.5%.

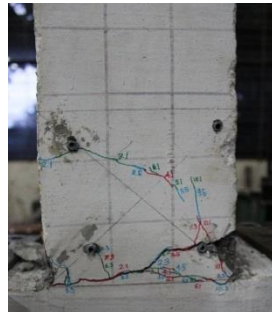
Retak di salah satu sisi kolom bermula dari retak horizontal pada dasar kolom dan pada grid kedua (100 mm) dari dasar kolom. Sedangkan di sisi yang lain, retak bermula sebagai retak horizontal di grid pertama (44 mm) dari dasar kolom. Retak pada sisi ini kemudian berkembang menjadi retak miring (*inclined crack*) dan menyambung dengan retak lentur di dasar kolom (gambar 4.13). Retak tersebut mulai terlihat di *drift* 0.50%.

Hingga *drift* 3.00%, perkembangan retak terkonsentrasi pada daerah dasar kolom dimana bukaan retak lentur-geser semakin lama semakin melebar. Retak lentur pada grid kedua berkembang menjadi retak geser dan memanjang hingga tengah kolom namun kemudian tidak mengalami perkembangan lebih lanjut. Tidak terlihat adanya retak lain di sepanjang kolom. Retak vertikal yang terjadi di *drift* 3.5% berujung pada *spalling* selimut beton di akhir pengujian yaitu *drift* 4.50%. Retak-retak vertikal yang berpotensi menyebabkan *spalling* selimut beton mulai bermunculan. Bukaan retak yang cukup lebar dapat terlihat di daerah dasar kolom.

Kegagalan yang terjadi berupa kegagalan lentur, namun sudah terlihat adanya perilaku geser pada spesimen kolom. Dapat disimpulkan bahwa penambahan jarak sengkang yang cukup signifikan dapat merubah perilaku kolom dari keruntuhan lentur menjadi keruntuhan geser.



Gambar 4.12 Kerusakan pada spesimen kolom L25C di berbagai peningkatan *drift*



Tampak depan



Tampak samping kanan



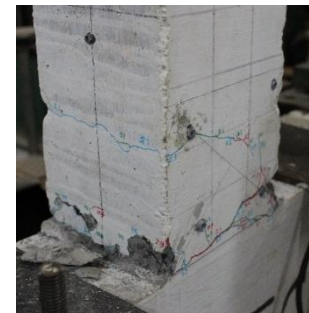
Tampak perspektif kanan



Tampak belakang



Tampak samping kiri



Tampak perspektif kiri

Gambar 4.13 Tampak specimen kolom pada akhir pengujian (*drift* 4.5%)

4.3.3 Spesimen Kolom M15C

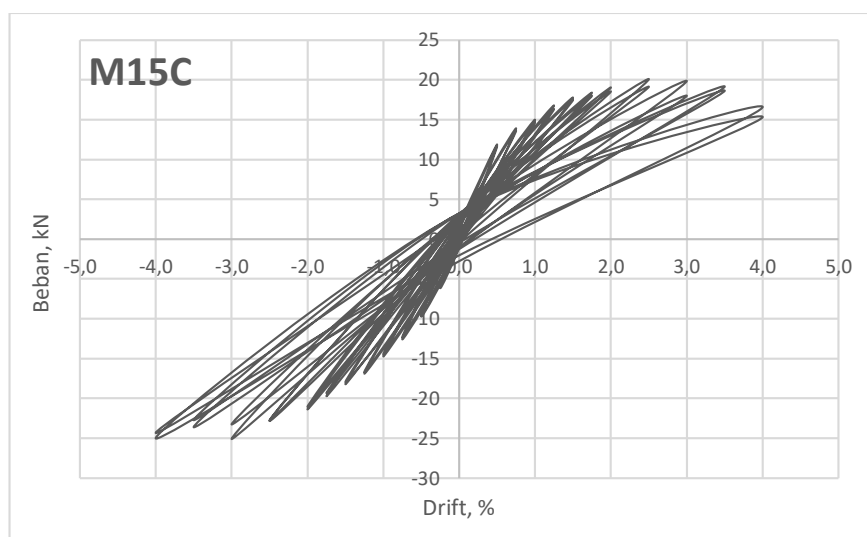
Spesimen kolom dengan rasio tulangan longitudinal 1.1% dan jarak antar sengkang 150 mm dikenakan beban aksial konstan dengan rasio 9%. Rasio beban aksial lebih rendah akibat mutu beton kolom yang ternyata mencapai 27 MPa, sedangkan beban aksial dihitung berdasarkan mutu beton rencana 20 MPa. Pada tiap kenaikan siklus kolom menerima penambahan *drift* sebesar 0.25%.

Retak vertikal memanjang dari dasar kolom menuju dasar tumpuan balok terjadi di *drift* 0.25%. Retak ini diprediksi akibat mutu balok yang rendah, namun tidak berpengaruh pada pengujian lebih lanjut. Retak pada kolom diawali dengan retak horizontal di dasar kolom dan grid pertama dari dasar kolom (42 mm di sisi tarik kolom yang didorong (*pushed*) dan 85 mm di sisi tarik (*tension*) kolom yang ditarik (*pulled*)). Retak lentur ini terjadi pada *drift* 0.50% dan beban lateral 11.8 kN. Seperti spesimen-spesimen sebelumnya, beban lateral retak hasil eksperimen mencapai dua kali lipat hasil perhitungan analitis sebesar 5.16 kN.

Tulangan longitudinal mulai mengalami leleh pada *drift* 1.28%. Retak horizontal di dasar kolom terus memanjang, sedangkan retak horizontal di grid kedua berkembang menjang retak geser. Fase leleh pada kolom tercapai saat beban lateral 16.78 kN, lebih kecil dari hasil perhitungan analitis 17.98 kN.

Drift terus ditingkatkan hingga kolom mencapai beban puncak sebesar 19.62 kN pada *drift* 2.50%. Beban lateral puncak sedikit lebih besar dari hasil perhitungan analitis sebesar 18.48 kN. Retak terkonsentrasi pada retak lentur di dasar kolom dan kombinasi retak lentur-geser di grid kedua, yaitu di area sendi plastis. Retak bertambah lebar dan mulai terlihat adanya bukaan seiring semakin besarnya simpangan kolom. Pada *drift* 1.75% terjadi retak geser di grid kelima (250 mm) dari dasar kolom, menunjukkan kapasitas geser kolom semakin terdegradasi akibat peningkatan simpangan kolom.

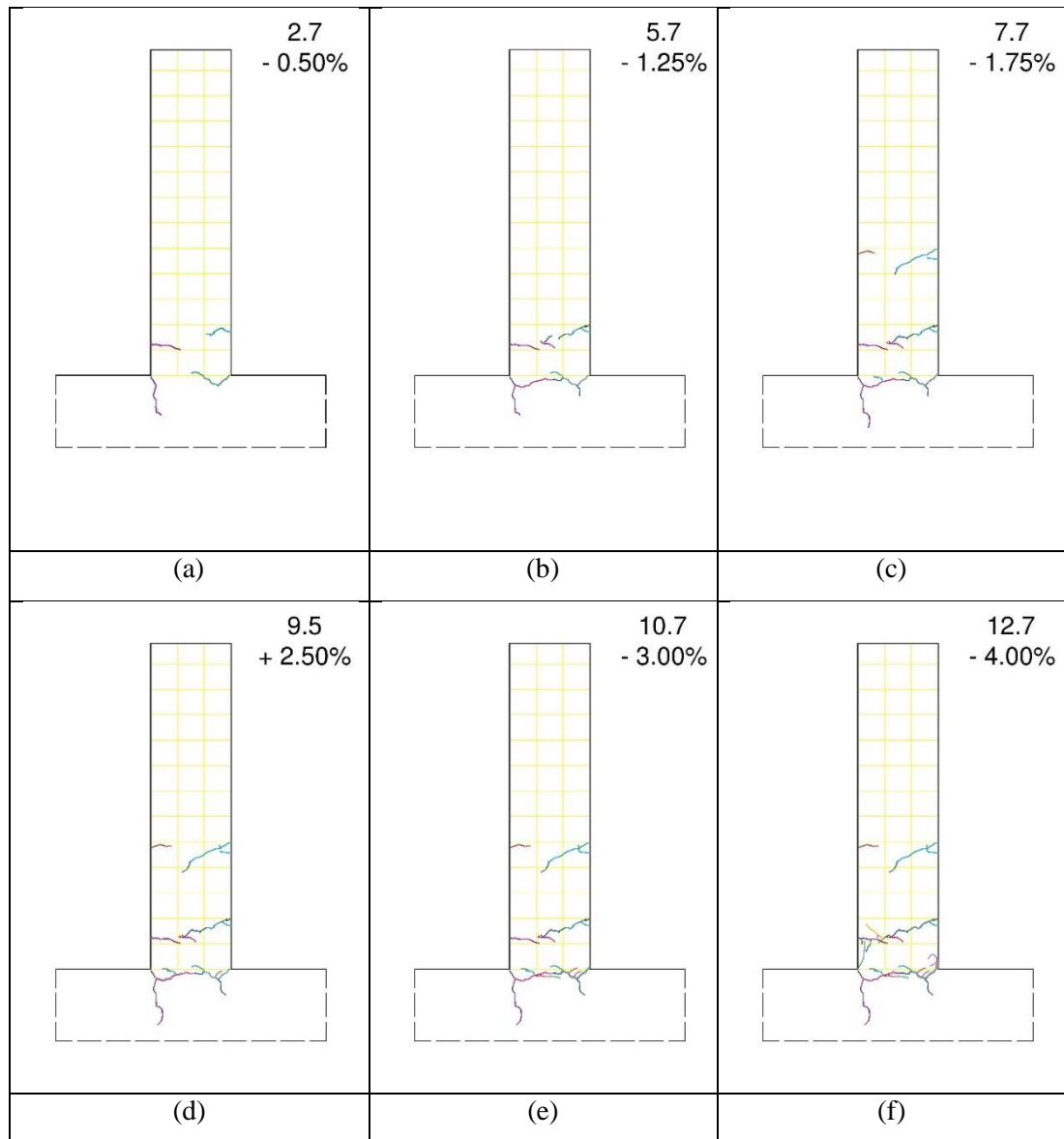
Mendekati kegagalan lateral di *drift* 4.0%, bukaan retak lentur di dasar kolom semakin melebar dan mulai terjadi bukaan pada retak lentur-geser di grid kedua, sedangkan retak geser di grid kelima tidak berkembang lebih lanjut. Retak vertikal terlihat timbul di dekat tulangan longitudinal saat akhir pengujian, yaitu tepat saat kegagalan lateral tercapai di *drift* 4.0%, akibat tegangan tekan yang cukup tinggi. Retak vertikal ini merupakan tanda awal terjadinya *spalling* selimut beton. Dibandingkan dengan spesimen L15C, terlihat lebih banyak retak yang timbul pada kolom akibat kekakuan kolom M15C yang lebih tinggi.

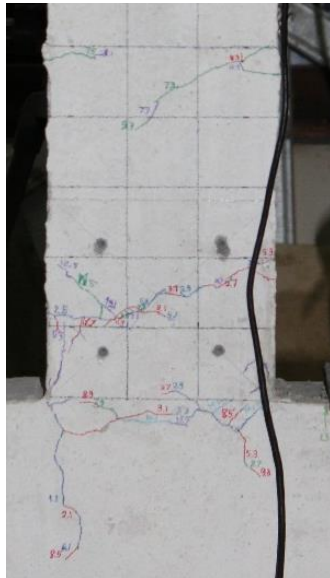


Gambar 4.14 Kurva histeresis spesimen M15C

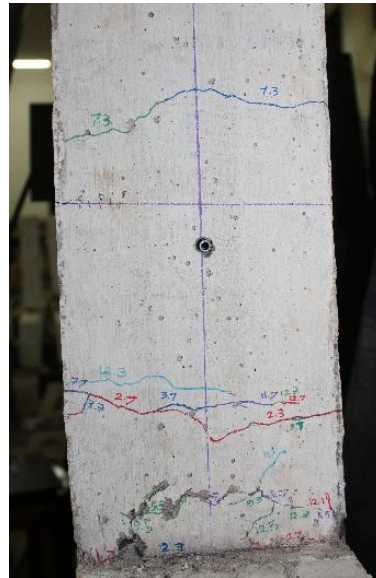
Tabel 4.7 Kapasitas dan *drift* spesimen M15C

M15C	Kapasitas (kN)				Drift (%)			
	F_{cr}	F_y	F_u	F_{lf}	δ_{cr}	δ_y	δ_u	δ_{lf}
Eksperimen	11.80	16.78	19.62	15.97	0.50	1.29	2.50	4.00
Teoritis	5.16	17.98	18.48	15.92	0.08	0.74	1.37	-

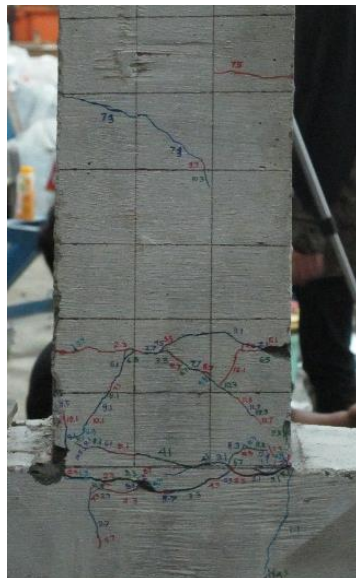
**Gambar 4.15** Kerusakan pada spesimen kolom M15C di berbagai peningkatan *drift*



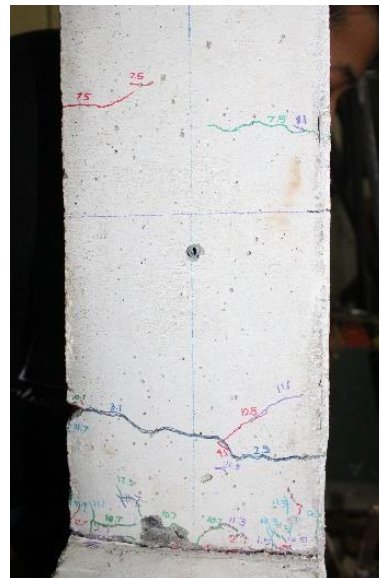
Tampak depan



Tampak samping kanan

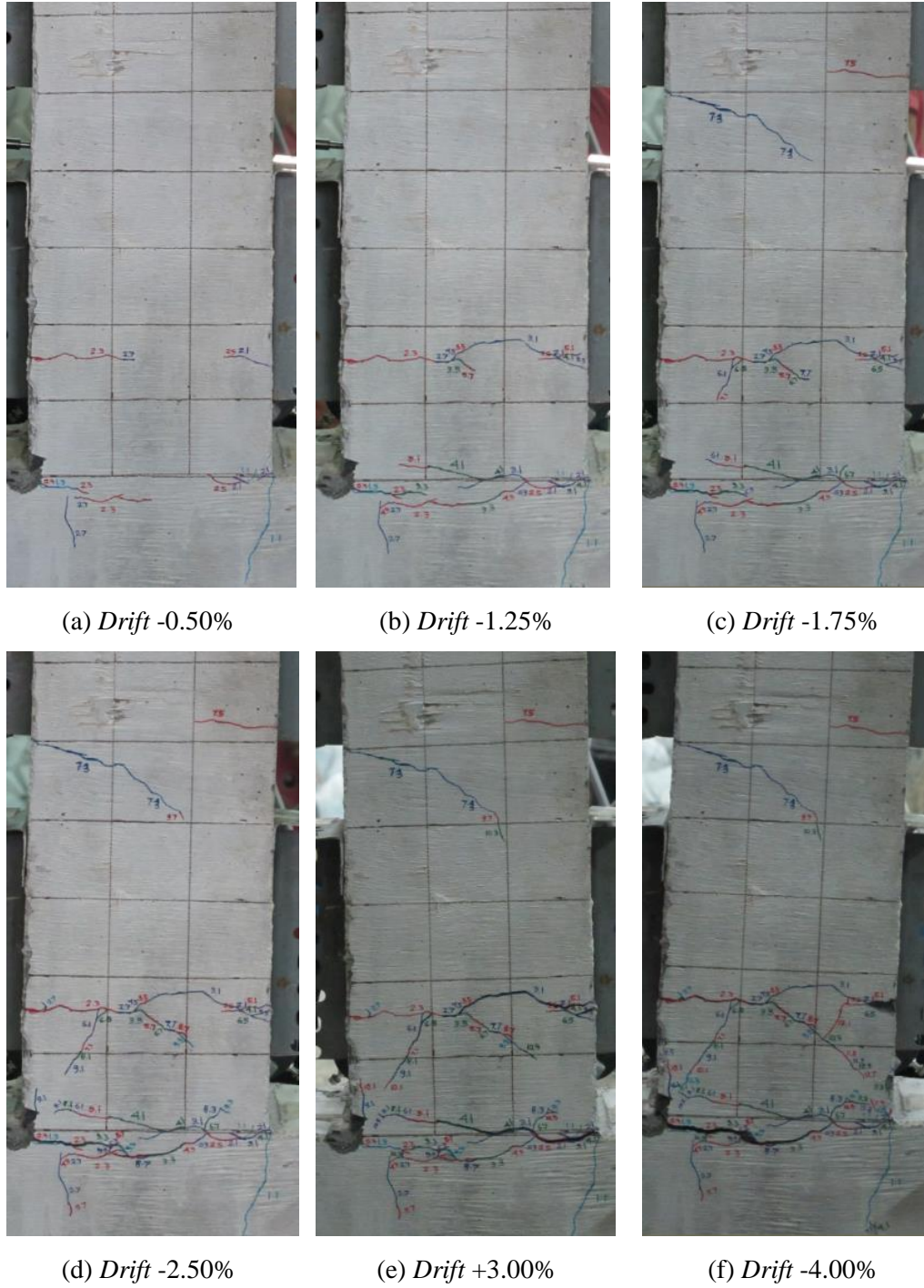


Tampak belakang



Tampak samping kiri

Gambar 4.16 Tampak spesimen kolom pada akhir pengujian (*drift* 4.0%)



Gambar 4.17 Kerusakan pada spesimen kolom M15C (tampak belakang) di berbagai peningkatan *drift*

4.3.4 Spesimen Kolom M25C

Spesimen M25C dengan jarak antar sengkang 250 mm memiliki perilaku geser yang paling terlihat dibandingkan dengan spesimen L15C, L25C dan M15C. Spesimen dikenakan beban aksial konstan dengan rasio 0.96 dan penambahan *drift* secara siklik sebesar 0.25% tiap siklus.

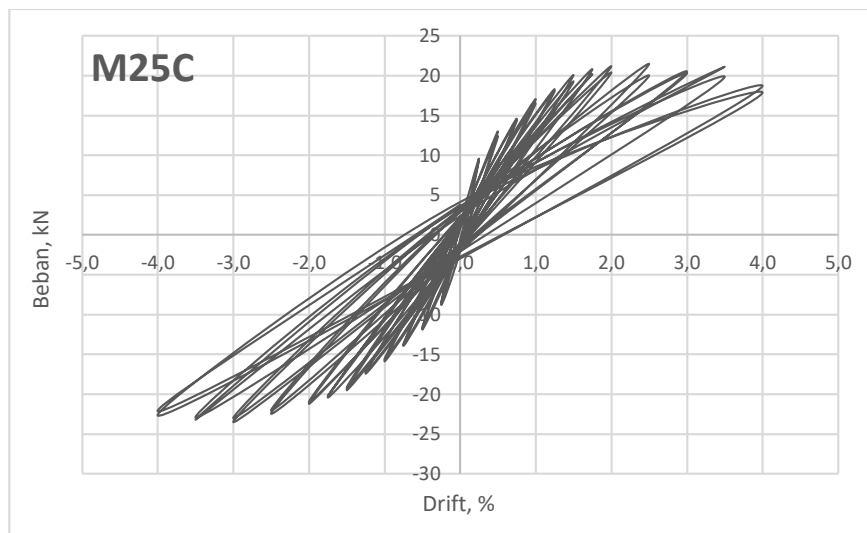
Retak awal berupa retak horizontal, bermula pada bagian dasar kolom, yaitu dimana momen diprediksi paling maksimum, dan pada grid ketiga (127 mm) dari dasar kolom. Sama dengan spesimen kolom sebelumnya, beban lateral retak 12.72 kN bernilai sekitar dua kali lipat lebih besar dari hasil perhitungan analitis (tabel 4.8).

Pada *drift* 0.75% terjadi retak miring (*inclined crack*) pada grid ketiga (147 mm) yang bermula dari retak lentur horizontal. Retak lentur yang berkembang menjadi retak geser juga timbul di sisi kolom yang lain pada grid ketiga atau 109 mm dari dasar kolom. Sementara itu retak lentur di dasar kolom semakin memanjang. Tulangan longitudinal mulai leleh di *drift* 1.29% dengan beban lateral 17.67 kN, hampir mendekati hasil perhitungan analitis 17.55 kN.

Hingga beban puncak tercapai di *drift* 2.0% tidak terjadi perkembangan retak yang signifikan. Kedua retak geser di grid ketiga memanjang dan saling menyilang satu sama lain. Retak-retak horizontal timbul di dasar kolom dan saling menyambung dengan retak horizontal yang sudah terjadi di *drift* sebelumnya. Bukaan retak telah terjadi di dasar kolom menunjukkan beton sudah tidak sanggup lagi mengikat kolom dan balok. Beban lateral puncak tercatat sebesar 20.80 kN, lebih besar dibandingkan hasil perhitungan analitis 17.83 kN.

Mendekati akhir pengujian di *drift* 4.0%, retak geser di grid ketiga semakin memanjang dan pada akhirnya menyatu dengan retak horizontal di dasar kolom. Retak semakin bertambah di area sendi plastis, terutama terkonsentrasi di dasar kolom. Bukaan retak lentur di dasar kolom semakin melebar, begitu pula dengan bukaan retak geser di grid ketiga yang mulai terjadi pada *drift* 2.5%. Pada akhir pengujian di *drift* 4.0% terjadi retak vertikal di zona tekan kolom yang berujung pada *spalling* selimut beton.

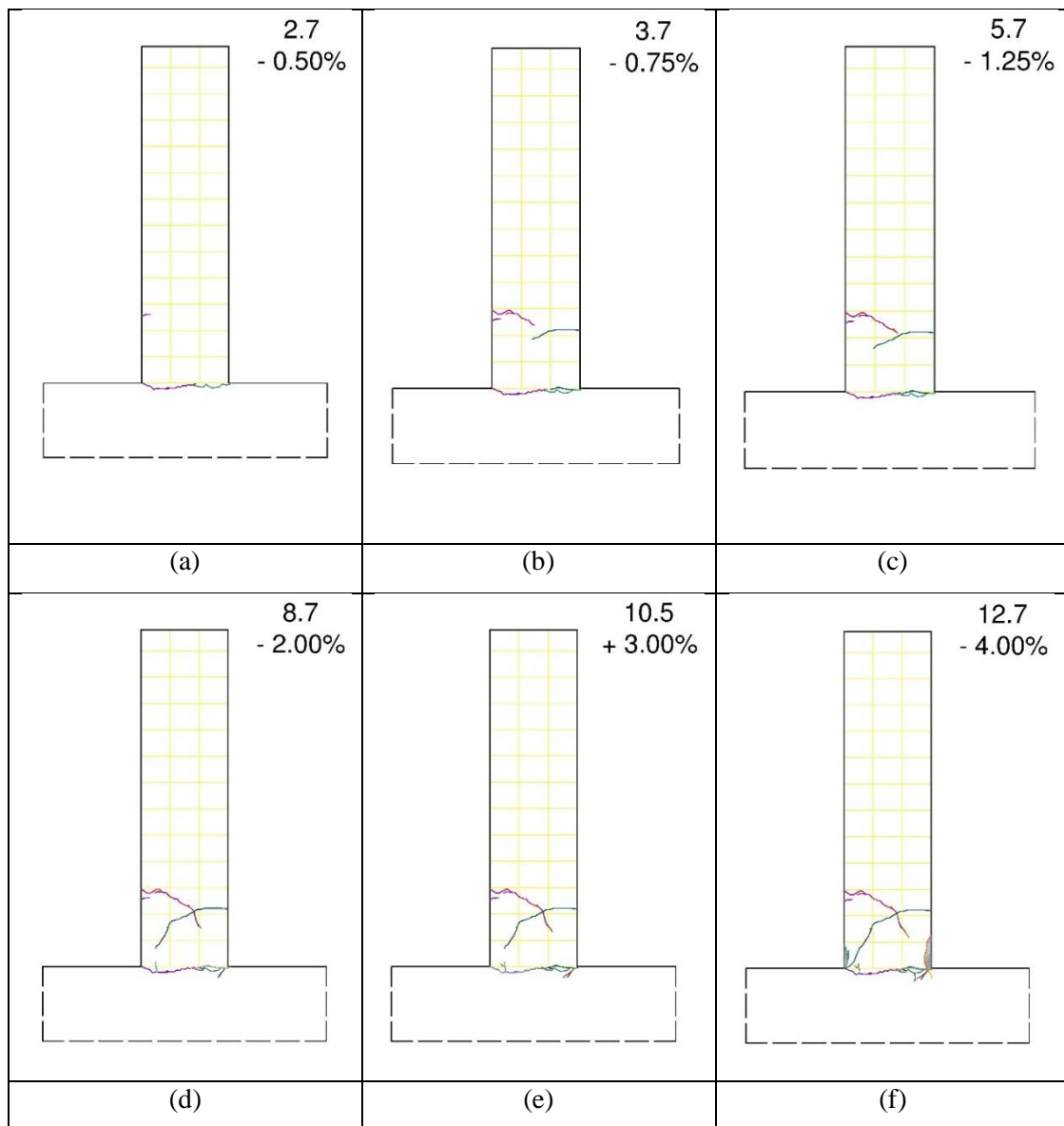
Beban lateral telah turun pada *drift* 4.0% yaitu 18.32 kN atau sekitar 88% dari beban lateral puncak. Spesimen M25C mencapai kapasitas puncak di *drift* yang lebih rendah dari spesimen M15C, namun kapasitas lateral kemudian cenderung konstan hingga turun secara tiba-tiba di *drift* 4.0%. Pengujian tidak dapat dilanjutkan akibat *slip hydraulic jack* dari *frame* pengujian.



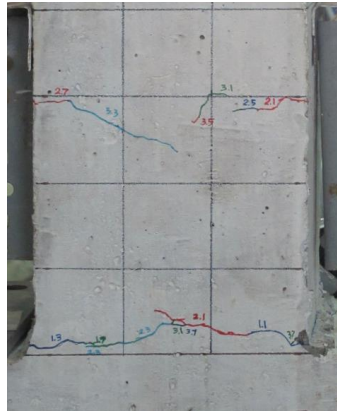
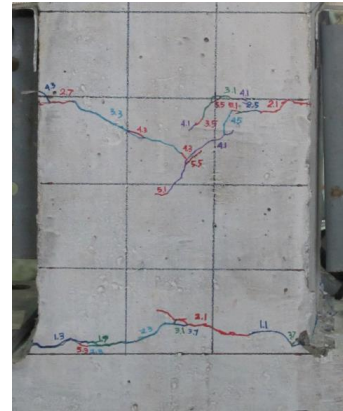
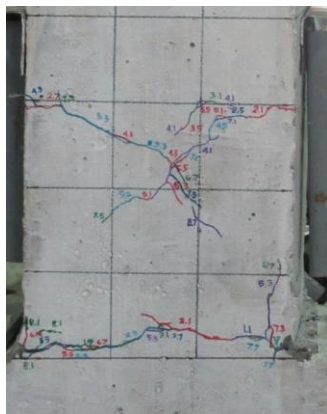
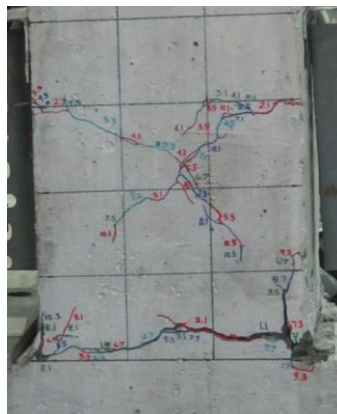
Gambar 4.18 Kurva histeresis spesimen M25C

Tabel 4.8 Kapasitas dan drift spesimen M25C

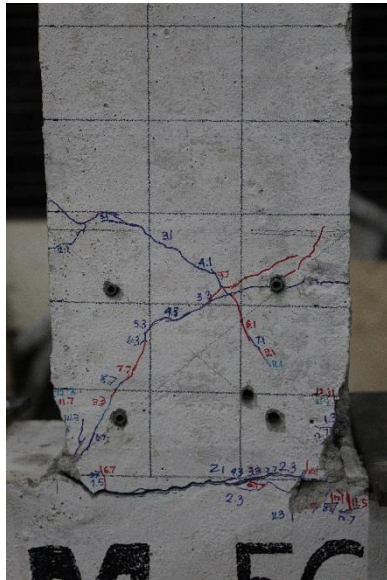
M25C	Kapasitas (kN)				Drift (%)			
	F_{cr}	F_y	F_u	F_{lf}	δ_{cr}	δ_y	δ_u	δ_{lf}
Eksperimen	12.72	17.67	20.80	-	0.50	1.15	2.00	-
Teoritis	4.80	17.55	17.83	-	0.08	0.78	1.18	-



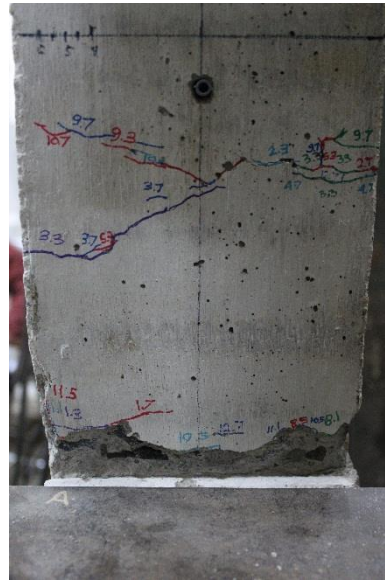
Gambar 4.19 Kerusakan pada spesimen kolom 2M25C di berbagai peningkatan *drift*

(a) *Drift -0.50%*(b) *Drift -0.75%*(c) *Drift -1.25%*(d) *Drift -2.00%*(e) *Drift +3.00%*(f) *Drift -4.00%*

Gambar 4.20 Kerusakan pada spesimen kolom 2M25C (tampak belakang) di berbagai peningkatan *drift*



Tampak depan



Tampak samping kanan



Tampak samping kiri



Tampak belakang

Gambar 4.21 Tampak spesimen kolom 2M25C pada akhir pengujian (*drift* 4.0%)

4.3.5 Spesimen Kolom L15SB

Spesimen kolom L15SB memiliki tulangan longitudinal yang tidak menerus, atau dengan kata lain disambung (*spliced*). Sambungan tulangan longitudinal adalah sepanjang 200 mm dihitung dari dasar kolom. Kolom dengan rasio tulangan longitudinal 0.8% dan jarak sengkang 150 mm dikenakan beban aksial konstan dan penambahan *drift* secara siklik sebesar 0.25% tiap siklus. Rasio beban aksial adalah 0.1 atau 10% dari kapasitas tekan kolom.

Retak bermula dari retak lentur horizontal di dasar kolom pada *drift* 0.50% dan beban lateral 8.85 kN. Retak lentur memanjang dari kedua sisi kolom dan menyatu di tengah kolom.

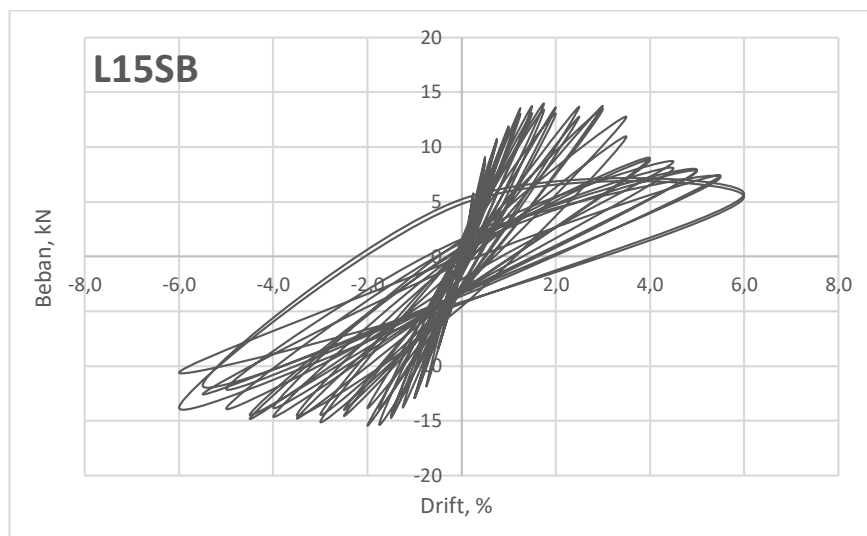
Di *drift* 0.75%, terbentuk retak lentur di dua tempat, yaitu grid keempat (216 mm) dari dasar kolom dan grid ketiga (110 mm) dari dasar kolom. Retak lentur di grid ketiga terlihat memanjang pada *drift* 1.0%. Kolom mengalami fase leleh di *drift* 0.9% dengan beban lateral 11.38 kN. Angka ini mendekati hasil perhitungan analitis sebesar 12.27 kN.

Mendekati *drift* puncak 1.75%, retak lentur di grid keempat berkembang menjadi retak geser yang saling menyilang (gambar 4.24). Sementara itu retak lentur di grid ketiga semakin memanjang. Retak lentur di dasar kolom semakin memanjang dan di *drift* 1.75% telah terlihat adanya bukaan di dasar kolom. Sambungan tulangan pada spesimen L15SB dengan panjang yang tidak memenuhi standar kemungkinan tidak dapat meneruskan tegangan tarik yang diterima oleh tulangan longitudinal sehingga terjadi *slip* tulangan longitudinal. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya perpindahan *yield penetration* yang lebih besar dibandingkan spesimen kolom lainnya. Kolom tidak dapat mempertahankan kapasitas lateralnya setelah mencapai beban 13.69 kN, 10% lebih kecil bila dibandingkan beban puncak spesimen kolom L15C.

Retak geser di grid keempat dan retak geser di grid ketiga semakin memanjang seiring peningkatan *drift*. Namun kedua retak tersebut hanya berkembang hingga terjadi kegagalan lateral pada *drift* 3.50%. Kegagalan kolom diprediksi akan terjadi di dasar kolom karena terjadi bukaan retak yang cukup lebar. Spesimen kolom L15C dan L15B mencapai kapasitas puncak pada *drift* yang sama

yaitu 1.75%, namun kolom L15SB mengalami kegagalan lateral lebih dahulu pada *drift* 3.50%, menunjukkan kapasitas simpangan yang lebih kecil.

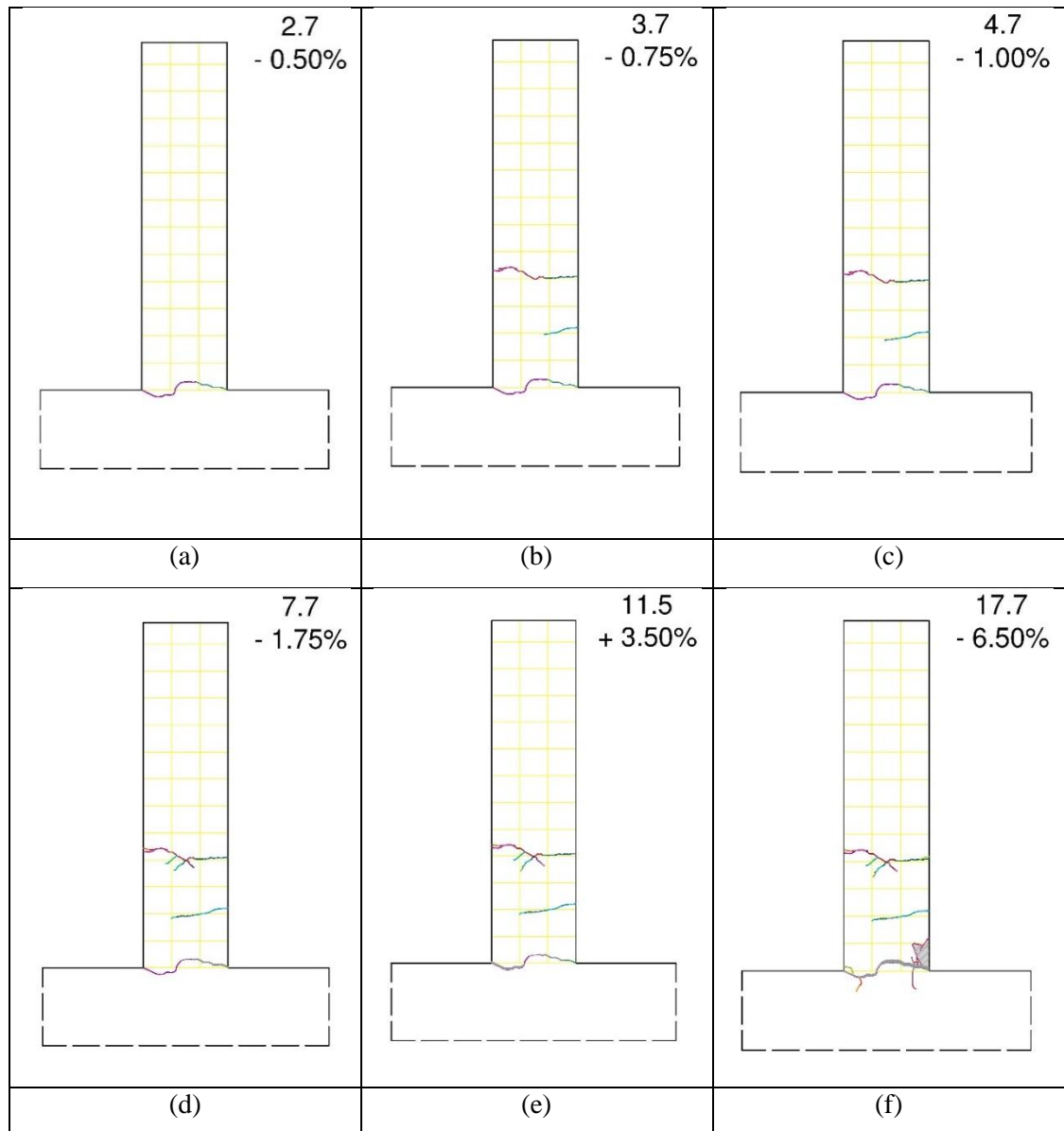
Pengujian dilanjutkan hingga *drift* 6.0%. Perilaku kolom lebih ke *rocking body movement* dimana retak yang telah terjadi sebelumnya tidak berkembang lebih lanjut dan juga tidak terlihat adanya retak baru. Yang terjadi hanyalah bukaan dasar kolom yang semakin lama semakin besar akibat meningkatnya simpangan kolom. Pada *drift* 6.0% selimut beton di ujung dasar kolom mengalami *crushing* yang cukup parah hingga tulangan longitudinal terlihat (gambar 4.27).



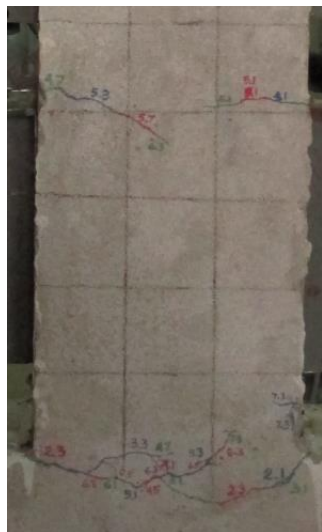
Gambar 4.22 Kurva histeresis spesimen L15SB

Tabel 4.9 Kapasitas dan *drift* spesimen L15SB

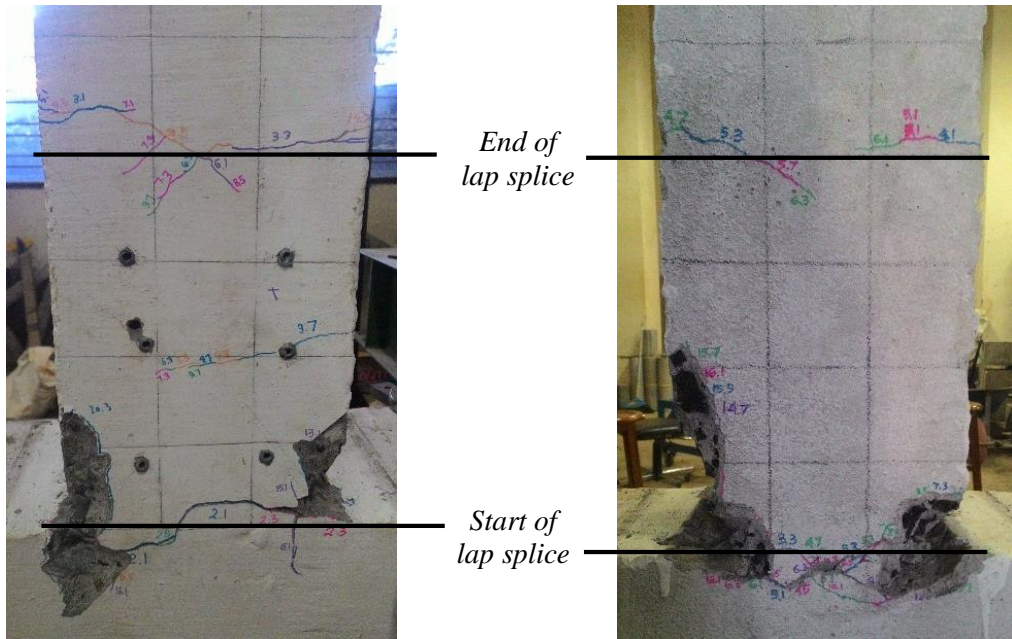
L15SB	Kapasitas (kN)				Drift (%)			
	F_{cr}	F_y	F_u	F_{lf}	δ_{cr}	δ_y	δ_u	δ_{lf}
Eksperimen	8.85	11.38	13.69	10.95	0.50	0.90	1.75	3.67
Teoritis	4.51	12.27	13.18	-	0.08	0.59	1.82	-



Gambar 4.23 Kerusakan pada spesimen kolom L15SB di berbagai peningkatan *drift*

(a) *Drift 0.50%*(b) *Drift 0.75%*(c) *Drift 1.00%*(d) *Drift 1.75%*(e) *Drift +3.50%*(f) *Drift -6.50%*

Gambar 4.24 Kerusakan pada spesimen kolom L15SB (tampak belakang) di berbagai peningkatan *drift*

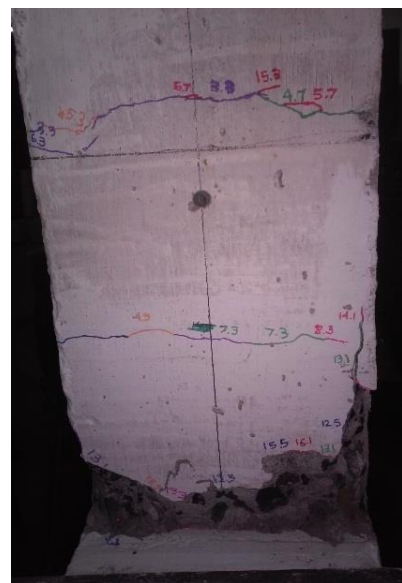


Tampak depan

Tampak belakang



Tampak samping kanan



Tampak samping kiri

Gambar 4.25 Tampak spesimen kolom L15SB pada akhir pengujian (*drift* 6.50%)



Gambar 4.26 (a) Tampak perspektif kanan kolom L15SB, terjadi *spalling* hingga tulangan longitudinal terlihat, (b) Tampak perspektif kiri kolom L15SB

4.3.6 Spesimen Kolom L15SM

Spesimen kolom L15SM memiliki tulangan longitudinal yang disambung (*spliced*) tepat di tengah kolom atau pada daerah di luar sendi plastis. Sambungan lewatan sepanjang 200mm dimulai dari ketinggian 220 mm dari dasar kolom. Kolom memiliki perilaku beban-perpindahan yang menyerupai spesimen L15C namun dengan daktilitas dan kapasitas beban lateral puncak yang lebih rendah. Pola kerusakan kolom juga sedikit berbeda bila dibandingkan dengan spesimen kolom dengan tulangan longitudinal yang menerus.

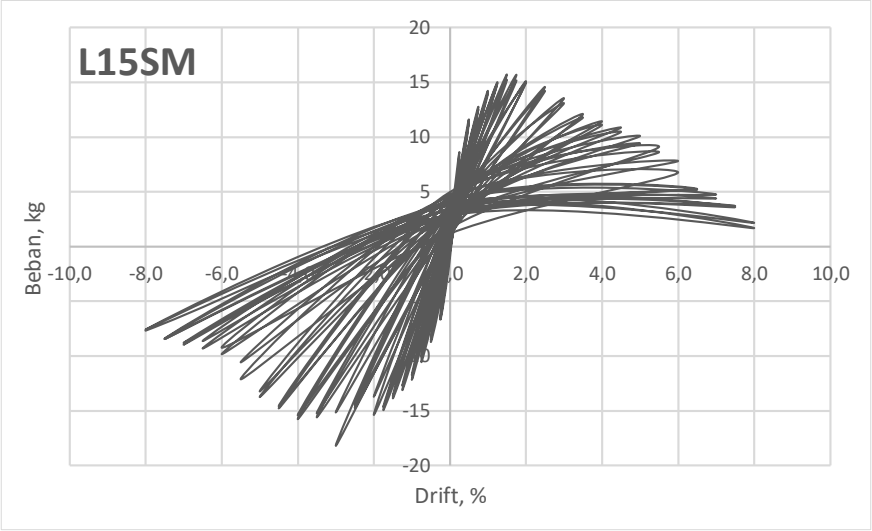
Saat beban lateral ditingkatkan hingga mencapai 11.44 kN di *drift* 0.50%, terbentuk retak lentur di dasar kolom dan retak miring (*inclined crack*) pada grid kedua (87 mm) dari dasar kolom. Retak lentur pada dasar kolom agak sedikit condong ke arah balok kemungkinan akibat mutu beton balok yang jauh lebih rendah dari kolom. Retak miring pada grid kedua memanjang hingga ke tengah kolom dan menyatu dengan retak lentur yang terbentuk pada sisi yang lain (gambar 4.29).

Tidak terjadi perkembangan retak di *drift* leleh 0.75%. Pada taraf beban lateral 12.42 kN tersebut, retak tetap berupa retak horizontal yang memanjang di dasar kolom dan retak miring yang memanjang dari grid kedua hingga grid pertama.

Dua siklus pengujian berikutnya, yaitu pada *drift* 1.50%, kolom telah mencapai kapasitas lateral puncak. Kolom memiliki kapasitas lateral puncak sebesar 15.47 kN yang nilainya mendekati spesimen L15C dengan tulangan menerus, namun dengan daktilitas ultimit yang lebih rendah. Pada *drift* 1.0% terlihat adanya retak lentur di grid kelima (232 mm) yang telah berkembang menjadi retak geser. Retak geser tersebut bertambah panjang dan lebar dan menembus hingga tengah kolom di *drift* 1.50%. Sementara itu retak lentur di dasar kolom juga semakin melebar dan mulai terbentuk retak-retak kecil di sekitarnya.

Drift dan beban lateral terus ditingkatkan hingga terjadi penurunan sekitar 80% kapasitas lateral puncak di *drift* 3.50%. Bukaan retak lentur di dasar kolom dan retak miring di grid kedua semakin melebar seiring peningkatan *drift*. Adanya bukaan retak yang cukup lebar di grid kedua menunjukkan *slip* tulangan longitudinal berpotensi tidak hanya terjadi di dasar kolom namun juga di grid kedua atau pertengahan daerah sendi plastis (gambar 4.30). Hal ini berbeda dengan kolom L15C dimana *slip* tulangan longitudinal hanya terjadi di sambungan kolom dengan balok.

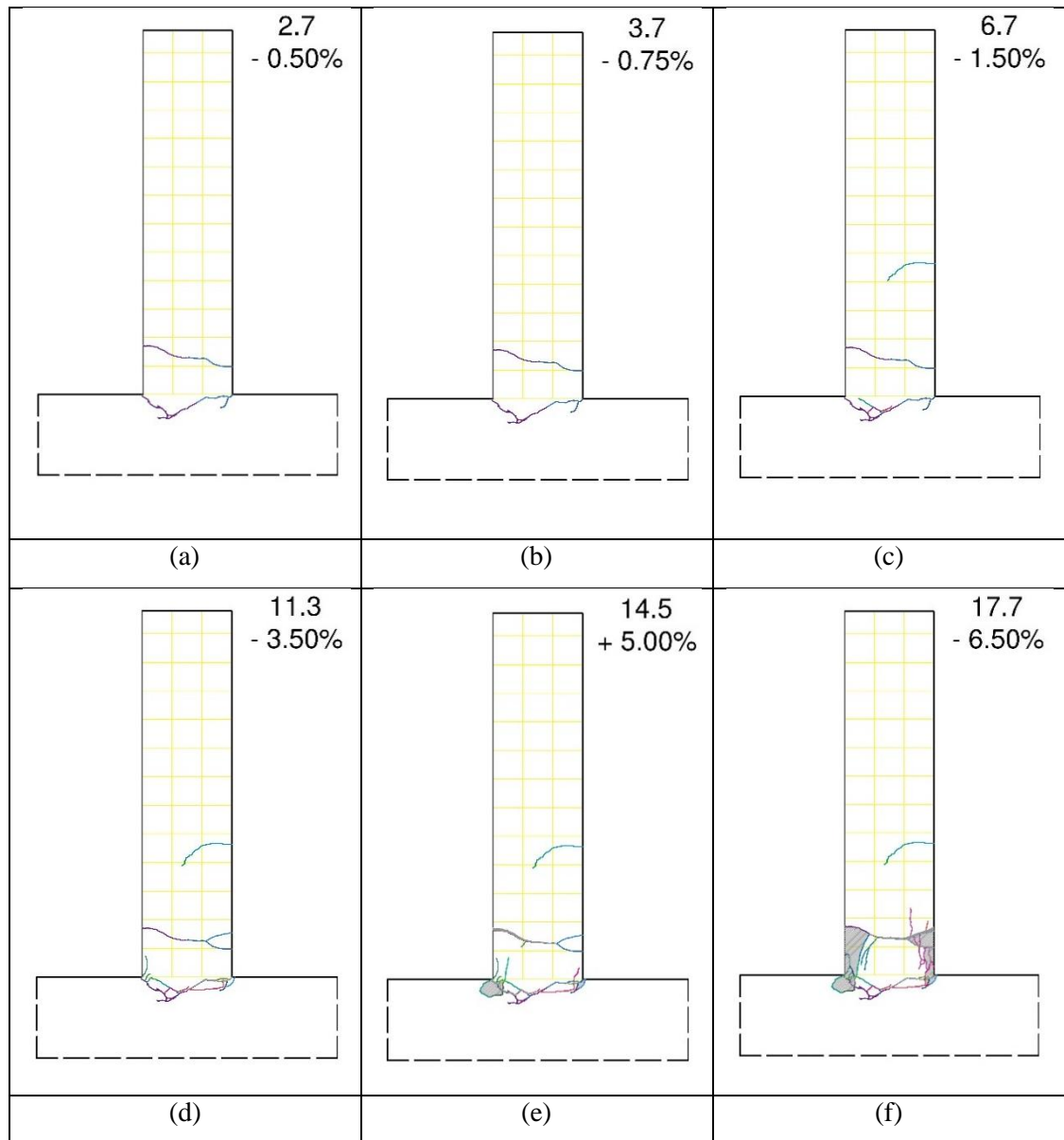
Mendekati akhir pengujian di *drift* 6.5%, retak di area dasar kolom bertambah parah dan mulai terjadi retak-retak vertikal pada zona tekan yang memanjang dari retak lentur di dasar kolom. Pada *drift* 5.0% retak vertikal dan retak miring di grid kedua saling menyambung. Kemudian di *drift* 5.5% bukaan retak lentur di dasar kolom menutup sedangkan bukaan retak miring di grid kedua semakin melebar. Adanya sambungan tulangan longitudinal yang tidak memadai di luar area sendi plastis menyebabkan daerah kerusakan inelastis menjauh dari dasar kolom dan mereduksi kapasitas daktilitas perpindahan kolom. Meskipun terjadi bukaan retak miring namun mekanisme kegagalan yang terjadi tetap berupa mekanisme lentur. Pada *drift* 6.0% retak vertikal di zona tekan kolom semakin bertambah dan akhirnya terjadi *spalling* selimut beton di separuh area sendi plastis hingga tulangan longitudinal terlihat (gambar 4.32).



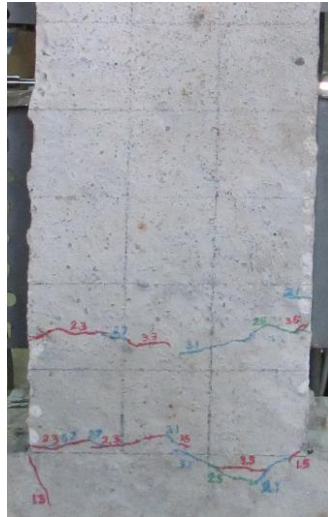
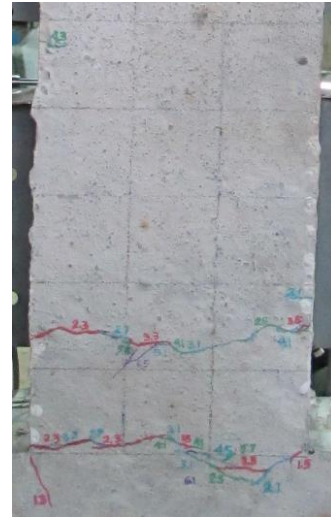
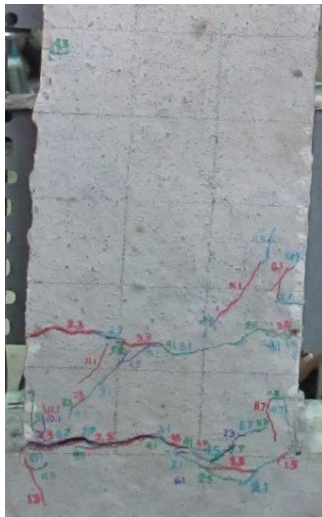
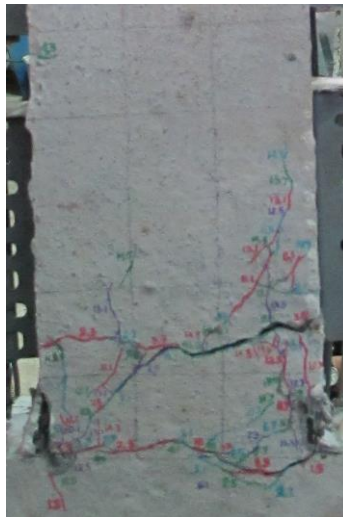
Gambar 4.27 Kurva histeresis spesimen L15SM

Tabel 4.10 Kapasitas dan *drift* spesimen L15SM

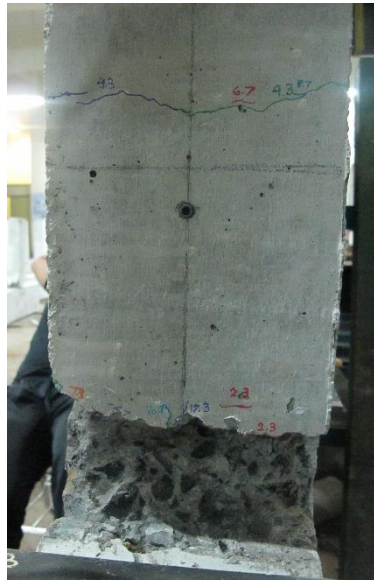
L15SM	Kapasitas (kN)				Drift (%)			
	F _{cr}	F _y	F _u	F _{lf}	δ _{cr}	δ _y	δ _u	δ _{lf}
Eksperimen	11.44	12.42	15.47	13.31	0.50	0.70	1.50	3.34
Teoritis	4.33	12.12	12.80	-	0.08	0.60	1.73	-



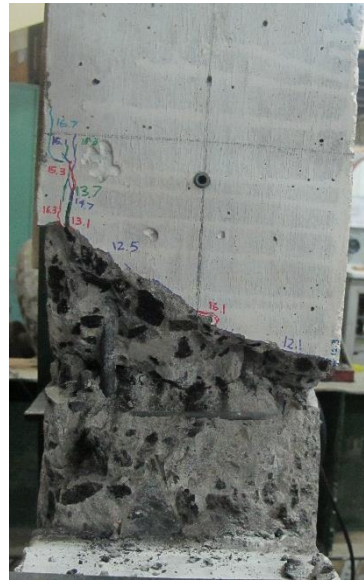
Gambar 4.28 Kerusakan pada spesimen kolom L15SM di berbagai peningkatan *drift*

(a) *Drift* -0.50%(b) *Drift* -0.75%(c) *Drift* -1.50%(d) *Drift* -3.50%(e) *Drift* +5.00%(f) *Drift* -6.50%

Gambar 4.29 Kerusakan pada spesimen kolom L15SM (tampak belakang) di berbagai peningkatan *drift*



Tampak samping kanan



Tampak samping kiri



Tampak perspektif kanan



Tampak perspektif kiri

Tulangan
longitudinal
terlihat

Gambar 4.31 Tampak spesimen kolom L15SM pada akhir pengujian (*drift* 6.5%)

4.3.7 Spesimen Kolom M15SB

Spesimen kolom M15SB memiliki tulangan longitudinal dengan rasio 1.3% yang disambung di daerah kritis, yaitu daerah sendi plastis di dasar kolom. Mekanisme kegagalan kolom hampir sama dengan kolom L15SB, dimana daerah kerusakan inelastis terletak di dasar kolom.

Peneliti menguji dua spesimen M15SB dengan perlakuan yang sama untuk memastikan kredibilitas hasil pengujian. Kedua spesimen mengalami mekanisme kegagalan lentur, namun ada sedikit perbedaan pada pola kerusakan. Pada spesimen

M15SB(2), pada akhir pengujian di *drift* 3.5%, kerusakan kolom terkonsentrasi di dasar kolom dan tidak terlihat adanya kerusakan yang di area sendi plastis. Sedangkan pada *drift* yang sama, spesimen M15SB(1) sudah memperlihatkan kerusakan yang cukup parah di sepanjang area sendi plastis.

Pada spesimen M15SB(1), pengujian dapat berlanjut hingga *drift* 5.5%, namun elemen perpindahan geser tidak terekam dengan baik sehingga tetap digunakan spesimen M15SB(2) di pembahasan lebih lanjut.

4.3.7.1 Spesimen Kolom M15SB(2)

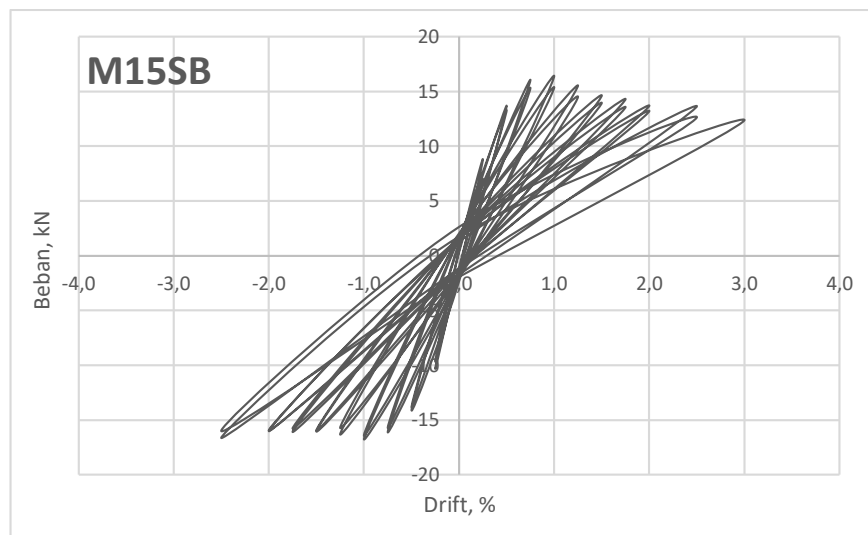
Retak sudah mulai terlihat pada *drift* 0.25% berupa retak rambut horizontal di grid kedua (73.4 mm) dari dasar kolom. Retak awal terjadi saat beban lateral sebesar 7.92 kN bekerja pada kolom. Nilai ini lebih besar dari hasil perhitungan analitis sebesar 5.01 kN.

Drift ditingkatkan hingga tulangan longitudinal diprediksi mulai mengalami leleh di *drift* 0.50%. Retak lentur yang merambat di sepanjang penampang kolom terbentuk pada dasar kolom. Sementara itu, retak lentur di grid kedua memanjang dan menembus hingga tengah kolom.

Peningkatan *drift* terus dilakukan dan kolom akhirnya mencapai kapasitas lateral puncak di *drift* 1.00%. Nilai *drift* ini jauh lebih rendah dari *drift* kapasitas lateral puncak spesimen kolom dengan tulangan menerus. Diprediksi akibat panjang sambungan yang tidak memadai, terjadi *slip* di sepanjang sambungan pada taraf beban yang kurang dari kapasitas momen nominal kolom, sehingga kolom kehilangan kekuatannya di *drift* yang relatif rendah. Di *drift* 0.75% terbentuk retak miring (*inclined crack*) pada grid kelima (245 mm) dan grid keempat (200mm) dari dasar kolom. Pada siklus berikutnya, yaitu *drift* 1.0%, terlihat adanya retak-retak kecil horizontal tepat di sambungan antara balok dan kolom.

Mendekati kegagalan lateral kolom di *drift* 3.0%, tidak terjadi perkembangan retak yang signifikan. Retak miring di grid keempat bertambah panjang pada *drift* 2.5%. Seiring peningkatan *drift*, bukaan retak lentur di dasar kolom semakin melebar dan terlihat adanya bukaan di *drift* 3.0%. Hingga akhir pengujian di *drift* 3.5%, daerah kerusakan inelastis tetap terkonsentrasi tepat di sambungan balok dan kolom (gambar 4.34).

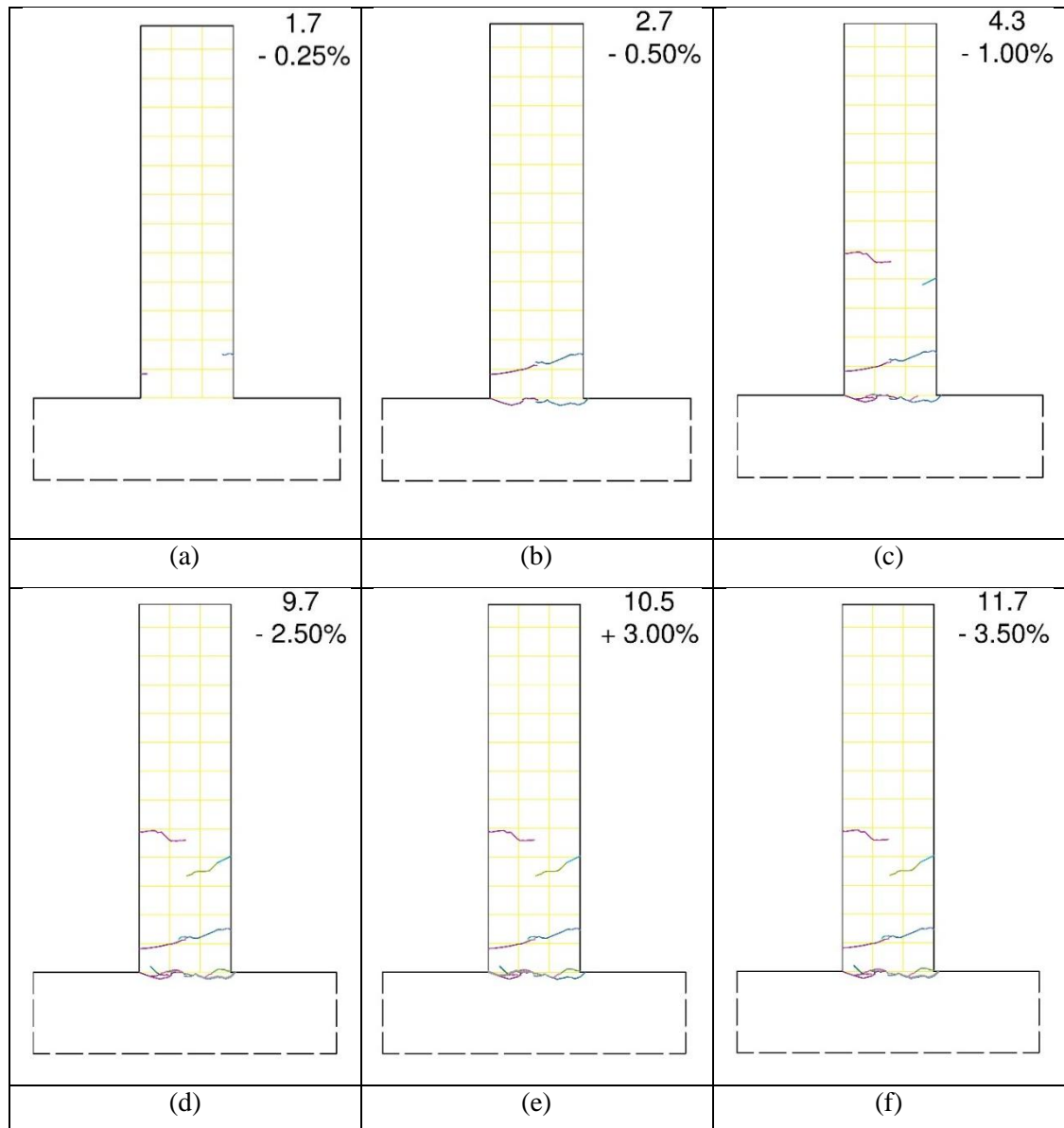
Tren kurva hubungan beban lateral-perpindahan spesimen kolom hampir mirip dengan kolom L15SB yang memiliki rasio tulangan lebih rendah ($\rho_v=0.8\%$). Kolom mencapai beban lateral puncak di *drift* yang relatif rendah, namun beban lateral turun secara perlahan sehingga daktilitas kegagalan lateral kolom (*ductility of lateral failure limit state*) cukup tinggi. Kemungkinan hal ini akibat kerusakan kolom terkonsentrasi sebagai kegagalan lentur di dasar kolom dan tidak terjadi mekanisme kegagalan yang lain di dalam maupun di luar area sendi plastis. Selain itu, slip tulangan di sepanjang sambungan memungkinkan rotasi sendi plastis yang lebih besar.



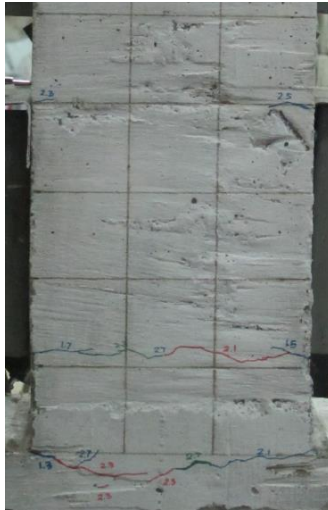
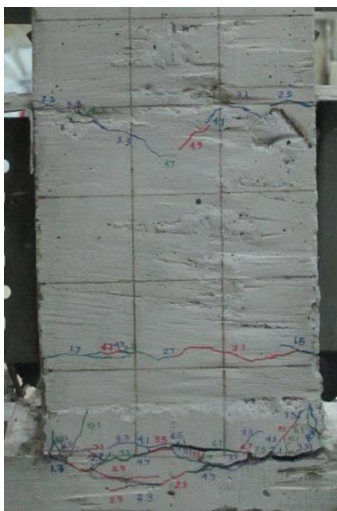
Gambar 4.32 Kurva histeresis spesimen M15SB(2)

Tabel 4.11 Kapasitas dan *drift* spesimen M15SB(2)

M15SB	Kapasitas (kN)				Drift (%)			
	F_{cr}	F_y	F_u	F_{lf}	δ_{cr}	δ_y	δ_u	δ_{lf}
Eksperimen	7.91	14.17	15.89	12.71	0.25	0.55	1.00	2.81
Teoritis	5.03	17.86	18.28	-	0.08	0.75	1.32	-



Gambar 4.33 Kerusakan pada spesimen kolom M15SB(2) di berbagai peningkatan *drift*

(a) *Drift* -0.25%(b) *Drift* -0.50%(c) *Drift* -1.00%(d) *Drift* -2.50%(e) *Drift* +3.00%(f) *Drift* -3.50%

Gambar 4.34 Kerusakan pada spesimen kolom M15SB(2) (tampak belakang) di berbagai peningkatan *drift*

4.3.7.2 Spesimen Kolom M15SB(1)

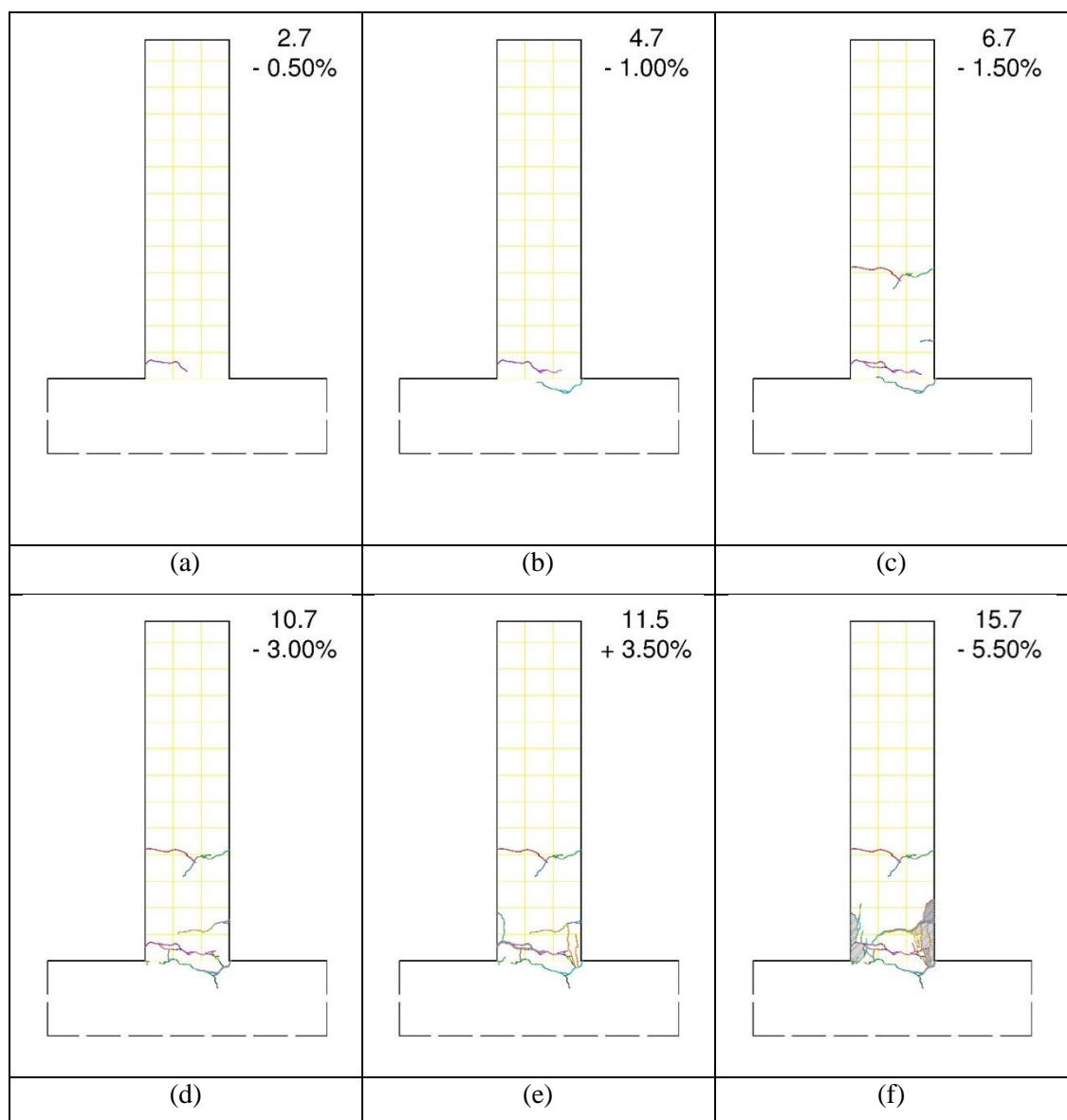
Pada spesimen M15SB(1), retak awal baru terlihat di *drift* 0.50% berupa retak lentur di grid pertama (26 mm) dari dasar kolom. Meskipun tidak tepat di dasar kolom, namun retak ini dapat dikatakan masih masuk dalam area tumpuan jepit dimana momen diprediksi paling maksimum. Retak lentur tepat di dasar kolom terjadi pada sisi kolom yang lain (gambar 4.37). Kemudian di *drift* 1.25% terlihat adanya retak horizontal pada grid kelima (211 mm) dari dasar kolom. Retak ini kemudian berkembang dan memanjang menjadi retak geser. Di siklus berikutnya, *drift* 1.50%, retak horizontal terlihat muncul pada grid kedua (72 mm) dari dasar kolom dimana masih termasuk dalam area sendi plastis.

Seiring peningkatan *drift*, retak lentur di dasar kolom dan di grid kedua semakin memanjang dan melebar, serta mulai terbentuk retak-retak kecil di sekitar retak lentur tersebut. Sementara itu di *drift* 2.5%, retak horizontal di grid kedua terlihat semakin memanjang dan menembus hingga tengah penampang kolom. Hingga *drift* 3.0%, perkembangan retak tampak terkonsentrasi di dasar kolom dimana retak lentur di grid pertama dan retak lentur tepat di dasar kolom semakin bertambah panjang dan lebar. Retak vertikal searah tulangan longitudinal pada zona tekan kolom terbentuk di *drift* 3.5%. Di *drift* ini juga mulai terlihat adanya bukaan pada retak horizontal di grid kedua. Retak ini kemudian berkembang menjadi retak geser pada *drift* 4.5%.

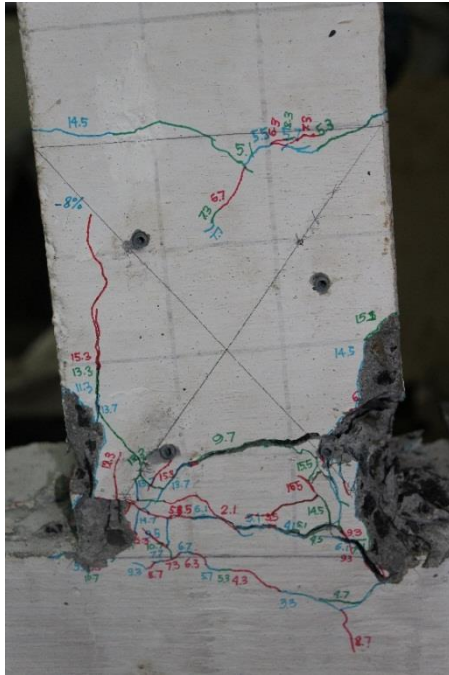
Drift yang terus ditingkatkan seiring penambahan siklus menyebabkan retak vertikal di zona tekan kolom semakin parah. Hingga akhirnya *spalling* selimut beton terjadi di *drift* 4.5%. Pengujian diakhiri di *drift* 5.5%. Retak vertikal terus memanjang hingga grid ketiga, terlihat pula *spalling* selimut beton telah terjadi di kedua sisi penampang. Meskipun selimut beton sudah pecah, namun di *drift* ini tulangan longitudinal belum terlihat sehingga kemungkinan masih ada kekangan yang dapat disediakan oleh selimut beton. Terlihat adanya bukaan yang cukup lebar di retak horizontal pada grid pertama, sedangkan bukaan pada retak horizontal di dasar kolom mulai menutup. Bukaan yang lebar justru terbentuk di retak lentur-geser pada grid kedua. Hal inilah yang sedikit membedakan antara pola kerusakan spesimen M15SB(1) dan M15SB(2). Pada spesimen M15SB(2), pada akhir pengujian di *drift* 3.5%, kerusakan kolom terkonsentrasi di dasar kolom dan tidak

terlihat adanya kerusakan lain di sekitar area sendi plastis. Sedangkan pada *drift* yang sama, spesimen M15SB(1) sudah memperlihatkan kerusakan yang cukup parah di sepanjang area sendi plastis.

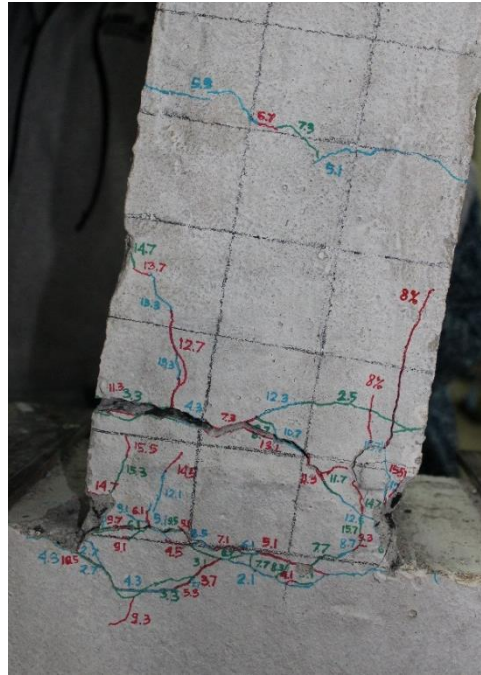
Bila dibandingkan, pola kerusakan antara kolom M15C, M15SB(1) dan M15SB(2) sebenarnya tidak jauh berbeda. Kerusakan inelastis akan terjadi di sekitar area sendi plastis dengan mekanisme kegagalan lentur. Namun pemberian sambungan di area kritis dengan panjang tidak memadai berpotensi membuat kolom gagal pada *drift* yang relatif lebih rendah.



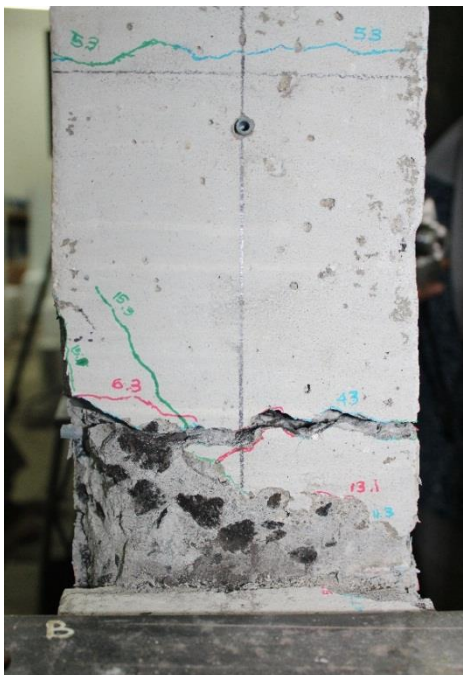
Gambar 4.36 Kerusakan pada spesimen kolom M15SB(1) di berbagai peningkatan *drift*



Tampak depan



Tampak belakang



Tampak samping kanan



Tampak perspektif kiri

Gambar 4.37 Tampak spesimen kolom M15SB(1) pada akhir pengujian (*drift* 5.5%)

4.3.8 Spesimen Kolom M15SM

Spesimen M15SM memiliki tulangan longitudinal dengan rasio 1.3% yang disambung (*spliced*) di luar daerah kritis, yaitu di tengah kolom. Sambungan lewatan dengan panjang 250 mm tersebut didesain untuk tidak memenuhi standar yang dianjurkan, maka perilaku yang diharapkan terjadi adalah adanya kerusakan inelastis yang menjauh dari dasar kolom.

Untuk memastikan kredibilitas hasil pengujian, peneliti menggunakan dua buah spesimen M15SM yang diuji di bawah kondisi yang sama. Namun, didapat dua hasil pengujian yang berbeda. Kegagalan kolom M15SM(2) lebih mengarah ke mekanisme lentur dengan kegagalan inelastis terjadi di 70 mm dari dasar kolom (grid kedua). Sedangkan kolom M15SM(1) mengalami kegagalan geser dengan retak diagonal mencapai grid kelima. Meskipun demikian, sebenarnya spesimen M15SM(2) memiliki perilaku yang menyerupai spesimen M15SM(1), dimana keduanya rentan terhadap kegagalan geser. Hanya saja pada spesimen M15SM(2), aksi lentur lebih dominan sehingga perilaku geser baru muncul pada akhir pengujian, sedangkan spesimen M15SM(1) sudah menunjukkan perilaku geser yang dominan dari awal pengujian hingga akhirnya terjadi kegagalan geser.

4.3.8.1 Spesimen Kolom M15SM(2)

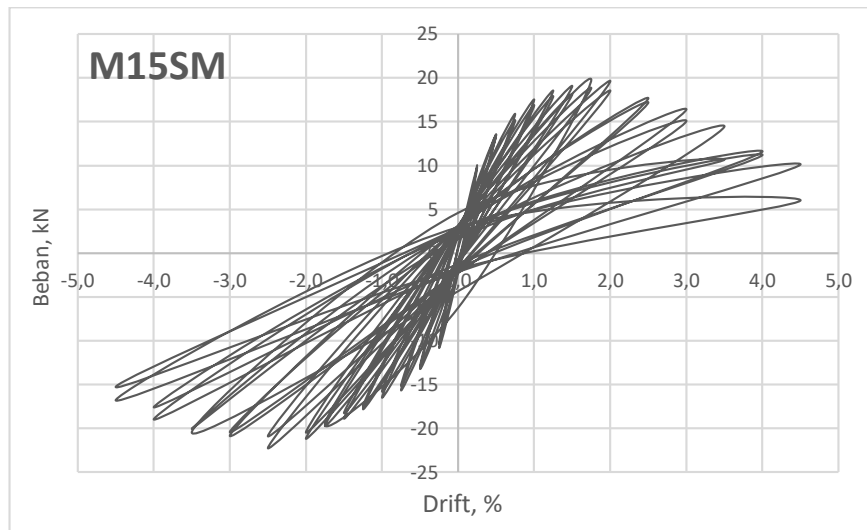
Pada spesimen M15SM(2), retak awal dimulai di *drift* 0.25% berupa retak lentur di grid pertama dan di dasar kolom. Retak awal terjadi pada taraf beban lateral 9.90 kN, hampir dua kali lipat dari hasil perhitungan analitis sebesar 4.96 kN.

Retak horizontal di grid pertama dan di dasar kolom kemudian memanjang hingga tengah kolom di *drift* 0.50%. Tulangan longitudinal diprediksi mulai mengalami leleh pada *drift* 0.75%. Pada *drift* ini terlihat adanya retak-retak kecil horizontal yang terjadi di dasar kolom.

Hingga beban lateral puncak tercapai di *drift* 1.75%, perkembangan retak masih terkonsentrasi di dasar kolom. Retak-retak kecil semakin bertambah dan retak horizontal utama di dasar kolom semakin melebar. Perkembangan retak terlihat mirip dengan spesimen M15SB(2). Kolom M15SM(2) mampu menahan beban lateral hingga 19.30 kN, sangat mendekati spesimen kolom dengan tulangan

menerus M15C yang dapat menahan beban lateral hingga 19.62 kN. Perbandingan antara kapasitas lateral tiap spesimen akan dibahas pada sub bab berikutnya.

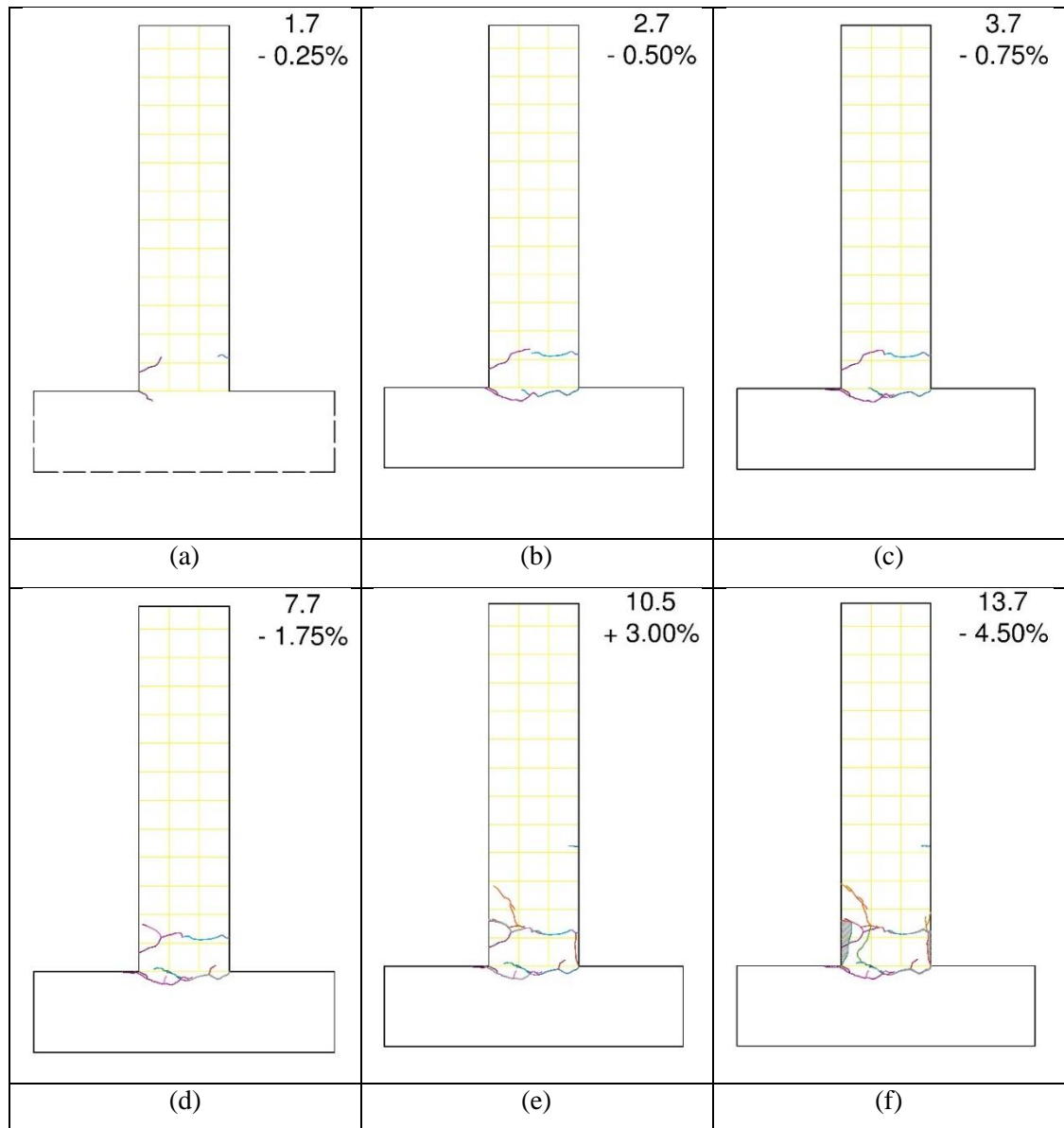
Kapasitas lateral turun dengan cukup cepat hingga akhirnya mencapai 80% beban lateral puncak di *drift* 3.0%. Pada *drift* 2.5% terjadi bukaan pada retak lentur di grid kedua, sedangkan bukaan retak di dasar kolom semakin melebar. Penambahan *drift* hingga 3.0% menyebabkan timbulnya retak diagonal yang memanjang hingga grid ketiga. Retak vertikal juga mulai terlihat di zona tekan kolom. Mendekati akhir pengujian di *drift* 4.5%, bukaan lentur di dasar kolom mulai menutup sedangkan bukaan retak lentur di grid kedua semakin melebar. Retak diagonal di grid ketiga memanjang dan akhirnya menyatu dengan retak vertikal di zona tekan kolom. *Spalling* selimut beton terjadi di *drift* 4.5%



Gambar 4.38 Kurva histeresis spesimen M15SM(2)

Tabel 4.12 Kapasitas dan *drift* spesimen M15SM(2)

M15SM	Kapasitas (kN)				<i>Drift</i> (%)			
	F_{cr}	F_y	F_u	F_{lf}	δ_{cr}	δ_y	δ_u	δ_{lf}
Eksperimen	9.90	15.90	19.30	15.74	0.25	0.80	1.75	3.00
Teoritis	5.03	17.86	18.28	-	0.08	0.75	1.32	-



Gambar 4.39 Kerusakan pada spesimen kolom M15SM(2) di berbagai peningkatan *drift*

A photograph of a piece of lined paper with a grid pattern. The paper is covered with handwritten numbers in blue and red ink, connected by lines, suggesting a data recording or graphing activity. The numbers are scattered across the grid, with some lines connecting them horizontally and vertically. The paper is slightly aged and has some stains.

Handwritten numbers on a grid paper:

- Top left: 3.3
- Top right: 2.5, 2.2
- Middle left: 2.7, 1.7, 2.3
- Middle center: 2.1, 2.5
- Middle right: 1.1
- Bottom left: 3.7, 1.3, 2.3
- Bottom center: 2.1
- Bottom right: 1.1, 2.1

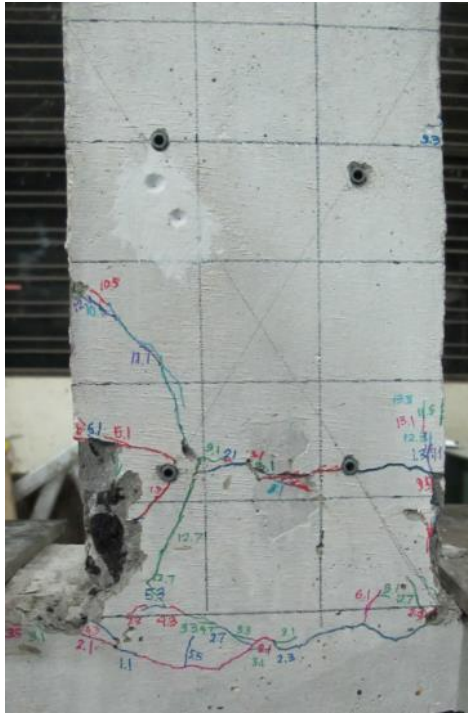
[illegible]

A hand-drawn map on a grid background, showing a network of roads and distances. The map includes a red line at the top, a blue line on the left, and a red line at the bottom. Various numbers are written along these lines and at intersections, representing distances or coordinates. The map is oriented with a north arrow pointing towards the top right.

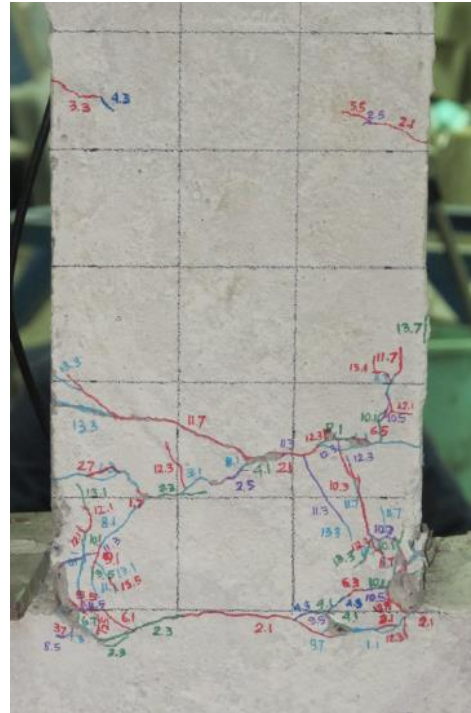
Key features and numbers on the map:

- Top Red Line:** 3.3 (4.3), 5.5, 2.3
- Left Blue Line:** 13.3, 2.7, 13.1, 8.1, 11.7, 11.5, 11.9, 11.4, 11.6, 11.7, 11.8, 11.9, 12.0, 12.1, 12.2, 12.3, 12.4, 12.5, 12.6, 12.7, 12.8, 12.9, 13.0, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 13.5, 13.6, 13.7, 13.8, 13.9, 14.0, 14.1, 14.2, 14.3, 14.4, 14.5, 14.6, 14.7, 14.8, 14.9, 15.0, 15.1, 15.2, 15.3, 15.4, 15.5, 15.6, 15.7, 15.8, 15.9, 16.0, 16.1, 16.2, 16.3, 16.4, 16.5, 16.6, 16.7, 16.8, 16.9, 17.0, 17.1, 17.2, 17.3, 17.4, 17.5, 17.6, 17.7, 17.8, 17.9, 18.0, 18.1, 18.2, 18.3, 18.4, 18.5, 18.6, 18.7, 18.8, 18.9, 19.0, 19.1, 19.2, 19.3, 19.4, 19.5, 19.6, 19.7, 19.8, 19.9, 20.0, 20.1, 20.2, 20.3, 20.4, 20.5, 20.6, 20.7, 20.8, 20.9, 21.0, 21.1, 21.2, 21.3, 21.4, 21.5, 21.6, 21.7, 21.8, 21.9, 22.0, 22.1, 22.2, 22.3, 22.4, 22.5, 22.6, 22.7, 22.8, 22.9, 23.0, 23.1, 23.2, 23.3, 23.4, 23.5, 23.6, 23.7, 23.8, 23.9, 24.0, 24.1, 24.2, 24.3, 24.4, 24.5, 24.6, 24.7, 24.8, 24.9, 25.0, 25.1, 25.2, 25.3, 25.4, 25.5, 25.6, 25.7, 25.8, 25.9, 26.0, 26.1, 26.2, 26.3, 26.4, 26.5, 26.6, 26.7, 26.8, 26.9, 27.0, 27.1, 27.2, 27.3, 27.4, 27.5, 27.6, 27.7, 27.8, 27.9, 28.0, 28.1, 28.2, 28.3, 28.4, 28.5, 28.6, 28.7, 28.8, 28.9, 29.0, 29.1, 29.2, 29.3, 29.4, 29.5, 29.6, 29.7, 29.8, 29.9, 30.0, 30.1, 30.2, 30.3, 30.4, 30.5, 30.6, 30.7, 30.8, 30.9, 31.0, 31.1, 31.2, 31.3, 31.4, 31.5, 31.6, 31.7, 31.8, 31.9, 32.0, 32.1, 32.2, 32.3, 32.4, 32.5, 32.6, 32.7, 32.8, 32.9, 33.0, 33.1, 33.2, 33.3, 33.4, 33.5, 33.6, 33.7, 33.8, 33.9, 34.0, 34.1, 34.2, 34.3, 34.4, 34.5, 34.6, 34.7, 34.8, 34.9, 35.0, 35.1, 35.2, 35.3, 35.4, 35.5, 35.6, 35.7, 35.8, 35.9, 36.0, 36.1, 36.2, 36.3, 36.4, 36.5, 36.6, 36.7, 36.8, 36.9, 37.0, 37.1, 37.2, 37.3, 37.4, 37.5, 37.6, 37.7, 37.8, 37.9, 38.0, 38.1, 38.2, 38.3, 38.4, 38.5, 38.6, 38.7, 38.8, 38.9, 39.0, 39.1, 39.2, 39.3, 39.4, 39.5, 39.6, 39.7, 39.8, 39.9, 40.0, 40.1, 40.2, 40.3, 40.4, 40.5, 40.6, 40.7, 40.8, 40.9, 41.0, 41.1, 41.2, 41.3, 41.4, 41.5, 41.6, 41.7, 41.8, 41.9, 42.0, 42.1, 42.2, 42.3, 42.4, 42.5, 42.6, 42.7, 42.8, 42.9, 43.0, 43.1, 43.2, 43.3, 43.4, 43.5, 43.6, 43.7, 43.8, 43.9, 44.0, 44.1, 44.2, 44.3, 44.4, 44.5, 44.6, 44.7, 44.8, 44.9, 45.0, 45.1, 45.2, 45.3, 45.4, 45.5, 45.6, 45.7, 45.8, 45.9, 46.0, 46.1, 46.2, 46.3, 46.4, 46.5, 46.6, 46.7, 46.8, 46.9, 47.0, 47.1, 47.2, 47.3, 47.4, 47.5, 47.6, 47.7, 47.8, 47.9, 48.0, 48.1, 48.2, 48.3, 48.4, 48.5, 48.6, 48.7, 48.8, 48.9, 49.0, 49.1, 49.2, 49.3, 49.4, 49.5, 49.6, 49.7, 49.8, 49.9, 50.0, 50.1, 50.2, 50.3, 50.4, 50.5, 50.6, 50.7, 50.8, 50.9, 51.0, 51.1, 51.2, 51.3, 51.4, 51.5, 51.6, 51.7, 51.8, 51.9, 52.0, 52.1, 52.2, 52.3, 52.4, 52.5, 52.6, 52.7, 52.8, 52.9, 53.0, 53.1, 53.2, 53.3, 53.4, 53.5, 53.6, 53.7, 53.8, 53.9, 54.0, 54.1, 54.2, 54.3, 54.4, 54.5, 54.6, 54.7, 54.8, 54.9, 55.0, 55.1, 55.2, 55.3, 55.4, 55.5, 55.6, 55.7, 55.8, 55.9, 56.0, 56.1, 56.2, 56.3, 56.4, 56.5, 56.6, 56.7, 56.8, 56.9, 57.0, 57.1, 57.2, 57.3, 57.4, 57.5, 57.6, 57.7, 57.8, 57.9, 58.0, 58.1, 58.2, 58.3, 58.4, 58.5, 58.6, 58.7, 58.8, 58.9, 59.0, 59.1, 59.2, 59.3, 59.4, 59.5, 59.6, 59.7, 59.8, 59.9, 60.0, 60.1, 60.2, 60.3, 60.4, 60.5, 60.6, 60.7, 60.8, 60.9, 61.0, 61.1, 61.2, 61.3, 61.4, 61.5, 61.6, 61.7, 61.8, 61.9, 62.0, 62.1, 62.2, 62.3, 62.4, 62.5, 62.6, 62.7, 62.8, 62.9, 63.0, 63.1, 63.2, 63.3, 63.4, 63.5, 63.6, 63.7, 63.8, 63.9, 64.0, 64.1, 64.2, 64.3, 64.4, 64.5, 64.6, 64.7, 64.8, 64.9, 65.0, 65.1, 65.2, 65.3, 65.4, 65.5, 65.6, 65.7, 65.8, 65.9, 66.0, 66.1, 66.2, 66.3, 66.4, 66.5, 66.6, 66.7, 66.8, 66.9, 67.0, 67.1, 67.2, 67.3, 67.4, 67.5, 67.6, 67.7, 67.8, 67.9, 68.0, 68.1, 68.2, 68.3, 68.4, 68.5, 68.6, 68.7, 68.8, 68.9, 69.0, 69.1, 69.2, 69.3, 69.4, 69.5, 69.6, 69.7, 69.8, 69.9, 70.0, 70.1, 70.2, 70.3, 70.4, 70.5, 70.6, 70.7, 70.8, 70.9, 71.0, 71.1, 71.2, 71.3, 71.4, 71.5, 71.6, 71.7, 71.8, 71.9, 72.0, 72.1, 72.2, 72.3, 72.4, 72.5, 72.6, 72.7, 72.8, 72.9, 73.0, 73.1, 73.2, 73.3, 73.4, 73.5, 73.6, 73.7, 73.8, 73.9, 74.0, 74.1, 74.2, 74.3, 74.4, 74.5, 74.6, 74.7, 74.8, 74.9, 75.0, 75.1, 75.2, 75.3, 75.4, 75.

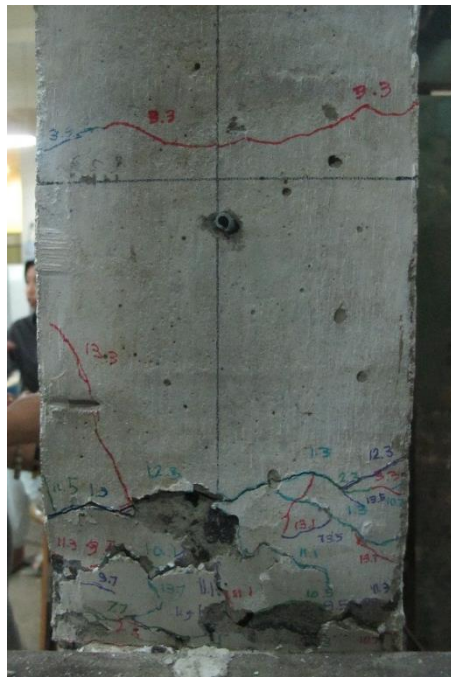
Gambar 4.40 Kerusakan pada spesimen kolom M15SM(2) (tampak belakang) di berbagai peningkatan *drift*



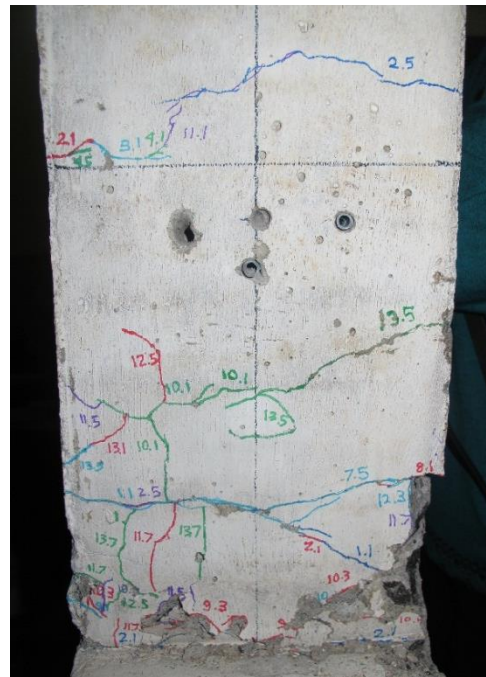
Tampak depan



Tampak belakang



Tampak samping kanan



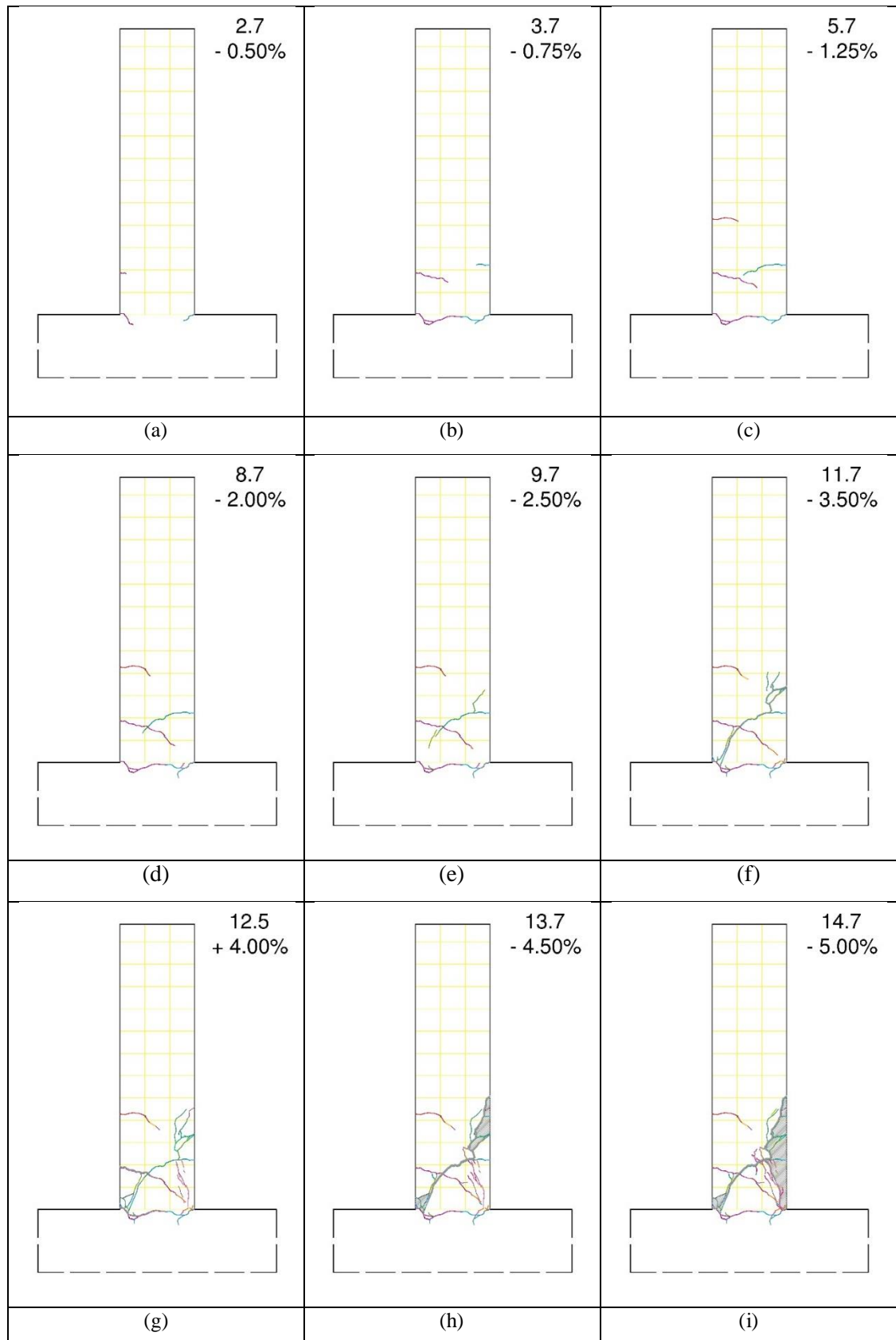
Tampak samping kiri

Gambar 4.41 Tampak spesimen kolom M15SM(2) pada akhir pengujian (*drift* 4.5%)

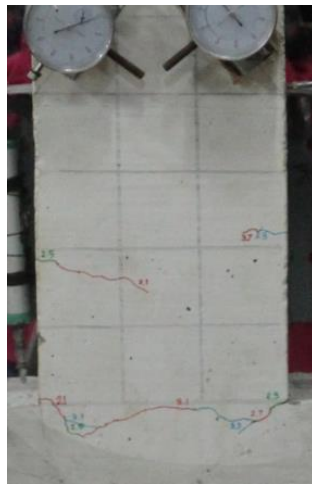
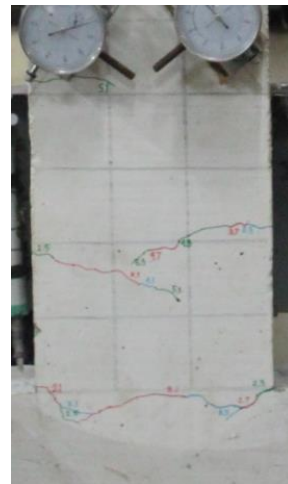
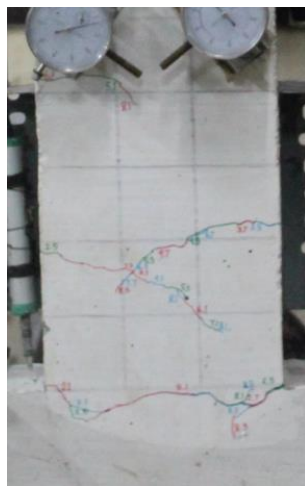
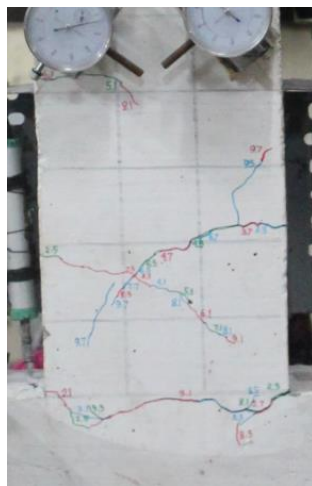
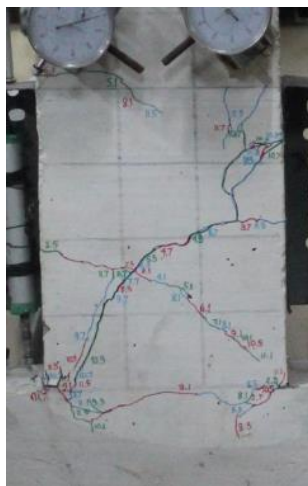
4.3.8.2 Spesimen Kolom M15SM(1)

Pada spesimen M15SM(1), retak berawal dari retak lentur di dasar kolom dan retak lentur pada grid kedua (100 mm) dari dasar kolom. Retak mulai terlihat di *drift* 0.5%. Retak lentur di dasar kolom kemudian memanjang hingga menembus tengah kolom di *drift* 0.75%. Sementara itu, retak lentur di grid kedua memanjang seiring penambahan *drift* dan kemudian berkembang menjadi retak geser di *drift* 1.25%. Perkembangan retak lebih terkonstrasi pada retak geser, dimana retak semakin memanjang dan melebar seiring penambahan *drift*. Pada *drift* 2.0% terlihat adanya retak diagonal yang saling menyilang. Hal ini berbeda dengan spesimen M15SM(2) dimana tidak terjadi perkembangan retak geser yang dominan.

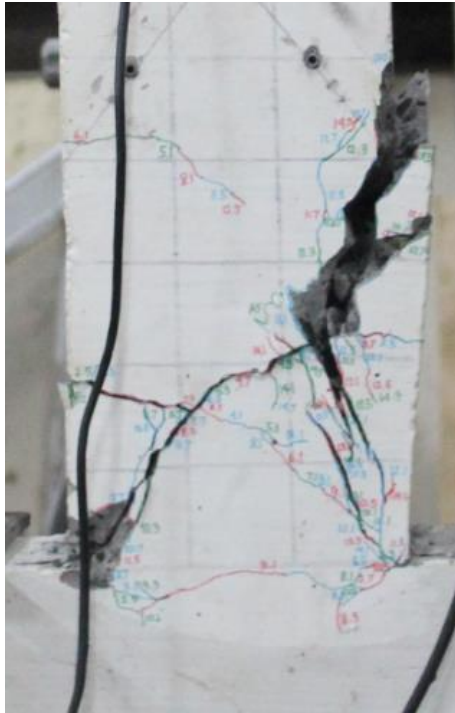
Seiring peningkatan *drift*, bukaan retak lentur di dasar kolom dan bukaan retak geser di grid kedua semakin melebar. Pada *drift* 2.5% retak diagonal memanjang hingga mencapai grid keempat. Retak diagonal tersebut kemudian mengalami bukaan yang cukup besar di *drift* 3.5%, disusul dengan timbulnya retak vertikal di zona tekan kolom yang memanjang hingga grid kelima di *drift* 4.0%. Spesimen ini memiliki zona retak yang paling besar bila dibandingkan dengan semua spesimen yang lain. Retak vertikal dan retak diagonal yang telah membuka saling menyambung hingga akhirnya terjadi *spalling* selimut beton dari dasar kolom hingga grid kelima pada akhir pengujian di *drift* 5.0%. Selimut beton pecah dan tulangan longitudinal terlihat, namun hingga *drift* 5.0% tulangan longitudinal belum mengalami *buckling* sehingga kolom masih dapat mempertahankan kapasitas aksialnya.



Gambar 4.42 Kerusakan pada spesimen kolom M15SM(1) di berbagai peningkatan *drift*

(a) *Drift -0.50%*(b) *Drift -0.75%*(c) *Drift -1.25%*(d) *Drift -2.00%*(e) *Drift -2.50%*(f) *Drift -3.50%*(g) *Drift +4.00%*(h) *Drift -4.50%*(i) *Drift -5.00%*

Gambar 4.43 Kerusakan pada spesimen kolom M15SM(1) di berbagai peningkatan *drift*



Tampak depan



Tampak belakang



Tampak perspektif kanan



Tampak perspektif kiri

Gambar 4.44 Tampak spesimen kolom M15SM(1) pada akhir pengujian (*drift* 5.0%)

4.4 Distribusi Perpindahan Lentur, Geser dan Penetrasi Leleh

Spesimen kolom beton bertulang jepit bebas dikenakan beban berupa beban aksial konstan dan beban lateral siklik. Deformasi lateral total yang terjadi terdiri dari tiga komponen perpindahan, yaitu: perpindahan lentur, perpindahan geser dan perpindahan penetrasi leleh. Gambar 4.48 hingga 4.51 menunjukkan distribusi ketiga komponen perpindahan pada masing-masing spesimen kolom.

4.4.1 Perpindahan Lentur

Spesimen kolom termasuk dalam kolom langsing dengan aspek rasio 4, pada kolom seperti ini umumnya perilaku lentur menjadi yang paling dominan. Tabel 4.13 menunjukkan kontribusi masing-masing komponen perpindahan terhadap perpindahan lateral total pada tiap siklus hingga beban lateral puncak tercapai. Dapat terlihat bahwa komponen perpindahan lentur menjadi komponen perpindahan yang utama pada hampir semua spesimen. Perilaku yang berbeda terlihat pada spesimen L15SB, dimana yang dominan justru komponen perpindahan penetrasi leleh. Spesimen L15SB memiliki sambungan tulangan longitudinal (*lap splice*) di daerah kritis (dasar kolom) dengan panjang sambungan (*splice*) kurang dari panjang yang dibutuhkan agar tulangan longitudinal dapat leleh akibat tarik (*tension*). Perpindahan *slip* di sepanjang sambungan berkontribusi signifikan terhadap perpindahan lateral atas (*top lateral displacement*), sehingga perpindahan pada spesimen L15SB lebih disebabkan rotasi badan kaku (*rigid body rotation*) akibat *slip* di sepanjang sambungan tersebut.

Gambar 4.52 hingga 4.54 menunjukkan distribusi kurvatur di sepanjang tinggi kolom, dimana gambar 4.52 dan 4.53 merupakan diagram kurvatur masing-masing spesimen di tiap penambahan *drift* sedangkan gambar 4.54 menunjukkan perbandingan diagram kurvatur antar spesimen pada kondisi beban puncak. Kurvatur rata-rata pada satu segmen (terdiri atas dua segmen, tiap segmen setinggi 200 mm, lihat gambar 3.1) di plot di titik tengah segmen tersebut. Kurvatur hanya dihitung di dua titik di sepanjang elevasi kolom, karenanya tidak terlihat perbedaan yang signifikan pada distribusi kurvatur untuk semua spesimen. Kurvatur terhitung paling besar pada segmen pertama yang berada di dasar kolom (di dekat sambungan balok-kolom) dan menurun seiring dengan peningkatan elevasi kolom. Dengan

demikian, kerusakan kolom akan terpusat di dasar kolom, dimana terjadi rotasi inelastis yang besar.

Distribusi kurvatur yang berbeda terlihat pada spesimen M15SM dengan nilai kurvatur di segmen kedua lebih meningkat dibandingkan dengan spesimen yang lain (gambar 4.53 dan 4.54). Hal ini mengindikasikan adanya rotasi inelastis yang menyebar hingga ke segmen kedua yang berpotensi memperpanjang sendi plastis spesimen. Perlu dicatat pula bahwa untuk spesimen L15SM dan M15SM terjadi pergeseran sendi plastis menjauhi sambungan balok-kolom.

Pada spesimen L15SB dan M15SB, kurvatur meningkat dengan tajam setelah *drift* lateral puncak tercapai (gambar 1.4). Kurvatur L15SB saat kegagalan lateral (80% P_u) meningkat 70% dibandingkan saat momen puncak, sedangkan kurvatur M15SB meningkat sekitar 50%. Kerusakan yang parah di sambungan balok-kolom, dan adanya *insufficient splice* di daerah dasar kolom, mereduksi kekakuan kolom secara signifikan, mengakibatkan besarnya nilai kurvatur di penampang kritis tersebut.

Gambar 4.54 dan Tabel 4.16 menunjukkan kapasitas kurvatur spesimen kolom pada kondisi beban puncak. Spesimen M15C, dengan rasio tulangan longitudinal yang paling tinggi dan menerus serta jarak sengkang yang paling rapat, memiliki kapasitas kurvatur yang paling besar. Sebaliknya, kapasitas kurvatur paling kecil dimiliki oleh spesimen dengan rasio tulangan longitudinal yang paling rendah dan sambungan lewatan (*lap splice*) di daerah kritis, yaitu spesimen L15SB. Penting untuk diperhatikan bahwa nilai kuat tekan beton berbeda untuk setiap spesimen, dan spesimen M15C bernilai kuat tekan beton paling tinggi (tabel 4.16). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan rasio tulangan longitudinal dapat meningkatkan kapasitas kurvatur kolom saat kondisi beban puncak, dimana *drift* puncak yang lebih tinggi bisa tercapai.

Pemberian sambungan lewatan tulangan longitudinal yang tidak memenuhi standar, entah pada daerah kritis atau di luar daerah kritis, menyebabkan turunnya kapasitas respon inelastis spesimen kolom. Ketika panjang sambungan kurang dari yang diperlukan, dapat terjadi *slip* di sepanjang sambungan pada taraf beban yang kurang dari kapasitas momen nominal kolom, sehingga kolom tersebut akan kehilangan kekuatannya dan gagal pada simpangan yang relatif rendah. Dari

gambar 1.4 terlihat bahwa spesimen dengan sambungan lewatan di daerah kritis sudah mencapai kapasitas puncaknya pada kapasitas kurvatur yang rendah, menunjukkan adanya degradasi beban lateral akibat kegagalan sambungan lewatan. Spesimen dengan sambungan lewatan di luar daerah kritis menunjukkan perform kapasitas kurvatur yang lebih baik meskipun masih dibawah kapasitas kurvatur dari spesimen kolom dengan tulangan longitudinal menerus.

Tabel 4.13 Komponen *drift* (%) spesimen saat beban lateral puncak

Spesimen	<i>Drift</i> Lateral	<i>Drift</i>	<i>Drift</i>	<i>Drift</i> Penetrasi
	Total	Lentur	Geser	Leleh
L15C	1.75	1.18	0.04	0.53
L25C	2.50	1.69	0.05	0.76
M15C	2.50	1.89	0.04	0.57
M25C	2.00	1.48	0.06	0.46
L15SB	1.75	0.52	0.01	1.22
L15SM	1.50	0.82	0.02	0.66
M15SB	1.00	0.73	0.01	0.25
M15SM	1.75	1.38	0.03	0.33

Tabel 4.14 Rasio *drift* lateral total dengan komponen *drift* saat kondisi beban lateral puncak

Spesimen	Komponen <i>Drift</i> / <i>Drift</i> Lateral Total		
	Lentur	Geser	Penetrasi Leleh
L15C	0.68	0.020	0.30
L25C	0.68	0.020	0.30
M15C	0.76	0.017	0.23
M25C	0.74	0.030	0.23
L15SB	0.30	0.004	0.70
L15SM	0.55	0.013	0.44
M15SB	0.73	0.013	0.25
M15SM	0.79	0.019	0.19

Tabel 4.15 Komponen *drift* geser saat kondisi kegagalan lateral

Spesimen	<i>Drift</i> Lateral Total	<i>Drift</i> Geser	<i>Drift</i> Geser / <i>Drift</i> Lateral total
L15C	4.00	0.07	0.017
M15C	4.00	0.08	0.020
L15SB	3.50	0.01	0.002
L15SM	3.50	0.20	0.057
M15SB	2.50	0.03	0.012
M15SM	3.00	0.14	0.047

Tabel 4.16 Kapasitas kurvatur di penampang kritis, kondisi beban puncak (ultimit)

Spesimen	Ket.	Jarak sengkang (mm)	ρ_v (%)	f'_c (MPa)	ϕ_u
L15C	Continuous	150	0.76	22.5	7.15E-05
L25C	Continuous	250	0.76	22.6	1.10E-04
M15C	Continuous	150	1.10	26.9	1.17E-04
M25C	Continuous	250	1.10	21.9	8.71E-05
L15SB	Spliced at the bottom	150	0.76	25.2	2.11E-05
L15SM	Spliced at the middle	150	0.76	22.1	4.55E-05
M15SB	Spliced at the bottom	150	1.10	25.4	3.02E-05
M15SM	Spliced at the middle	150	1.10	25.2	7.27E-05

4.4.2 Perpindahan Geser

Delapan spesimen dengan variabel rasio tulangan longitudinal, jarak sengkang dan sambungan lewatan tulangan longitudinal diuji terhadap beban siklik. Tabel 4.13 dan gambar 4.48 s/d 4.51 menunjukkan kontribusi komponen perpindahan geser terhadap perpindahan total. Perpindahan yang dominan untuk hampir semua spesimen adalah perpindahan lentur sedangkan *drift* akibat perpindahan geser cenderung sangat kecil, hanya berkisar antara 0,4% hingga 3% (lihat tabel 4.14).

Secara teoritis, penambahan jarak sengkang akan berdampak pada penurunan kapasitas geser spesimen kolom. Semakin minim selisih antara *demand* dan kapasitas geser yang dapat disediakan oleh kolom, semakin besar perpindahan geser yang akan terjadi. Pada spesimen dengan rasio tulangan longitudinal 0,8%, penambahan jarak tulangan geser tidak menyebabkan peningkatan kontribusi perpindahan geser terhadap perpindahan lateral total, kontribusi perpindahan geser yang terjadi adalah hampir sama, yaitu sekitar 2%. Hasil pengujian yang berbeda didapat pada spesimen dengan rasio tulangan longitudinal 1,1%, dimana penambahan jarak tulangan geser berdampak pada peningkatan kontribusi perpindahan geser dari 1,7% menjadi 3,0%.

Penempatan sambungan lewatan tulangan longitudinal juga mempengaruhi perpindahan geser spesimen. Spesimen dengan sambungan lewatan tulangan longitudinal di daerah kritis cenderung memiliki kontribusi perpindahan geser yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen lainnya. Sambungan lewatan di daerah kritis, dengan panjang sambungan tidak memenuhi kebutuhan, menyebabkan kerusakan kolom terutama disebabkan oleh *slip* di sepanjang sambungan. *Slip* semakin dominan pada spesimen kolom dengan tulangan ringan ($\rho_v = 0,8\%$), sehingga rotasi kolom lebih disebabkan oleh *rocking* dan bukan mekanisme lentur, hal ini berdampak pada rendahnya kontribusi perpindahan geser yaitu hanya 0.4% dari perpindahan lateral total.

Di lain pihak, penempatan sambungan lewatan tulangan longitudinal di luar daerah kritis (di tengah bentang) tidak memberikan efek yang signifikan terhadap kontribusi perpindahan geser hingga spesimen mencapai kapasitas lateral puncak, bila dibandingkan dengan spesimen kolom dengan tulangan menerus. Namun seiring dengan penambahan *drift*, kontribusi perpindahan geser pada spesimen L15SM dan M15SM semakin meningkat hingga mencapai 5% (lihat tabel 4.15) pada kondisi kegagalan lateral. Hal ini mengindikasikan adanya degradasi kekuatan geser secara drastis dengan ditempatkannya *insufficient splice* di luar daerah kritis dan spesimen rentan mengalami kegagalan lentur-geser (*flexural-shear failure*).

4.4.3 Perpindahan Penetrasi Leleh

Perpindahan penetrasi leleh terjadi akibat adanya akumulasi regangan pada tulangan longitudinal di daerah kritis, yaitu daerah sambungan balok dan kolom. Akibat kegagalan lekatan (*bond failure*) yang disebabkan oleh retak tarik pada beton, tegangan tarik dari kolom diteruskan ke balok atau pondasi hanya melalui tulangan baja. Akumulasi regangan di daerah sambungan menyebabkan tulangan baja memanjang secara lokal, timbul *gap opening* di sambungan dan kolom berotasi.

Wibowo (2010) mengusulkan persamaan sederhana untuk memprediksi perpindahan penetrasi leleh pada struktur kolom. Persamaan tersebut merupakan fungsi dari rasio tulangan longitudinal (ρ_v) dan rasio beban aksial (n), dimana tiap nilai momen penetrasi leleh M_{yp} dan kurvatur penetrasi leleh ϕ_{yp} didapat dari momen-kurvatur pada analisa lentur.

$$M_{yp} = \left[0,6 + 0,8\rho_v + 1,7 \frac{n}{\rho_v} \right] M_{lentur}$$

$$\phi_{yp} = 1,1 \phi_{lentur}$$

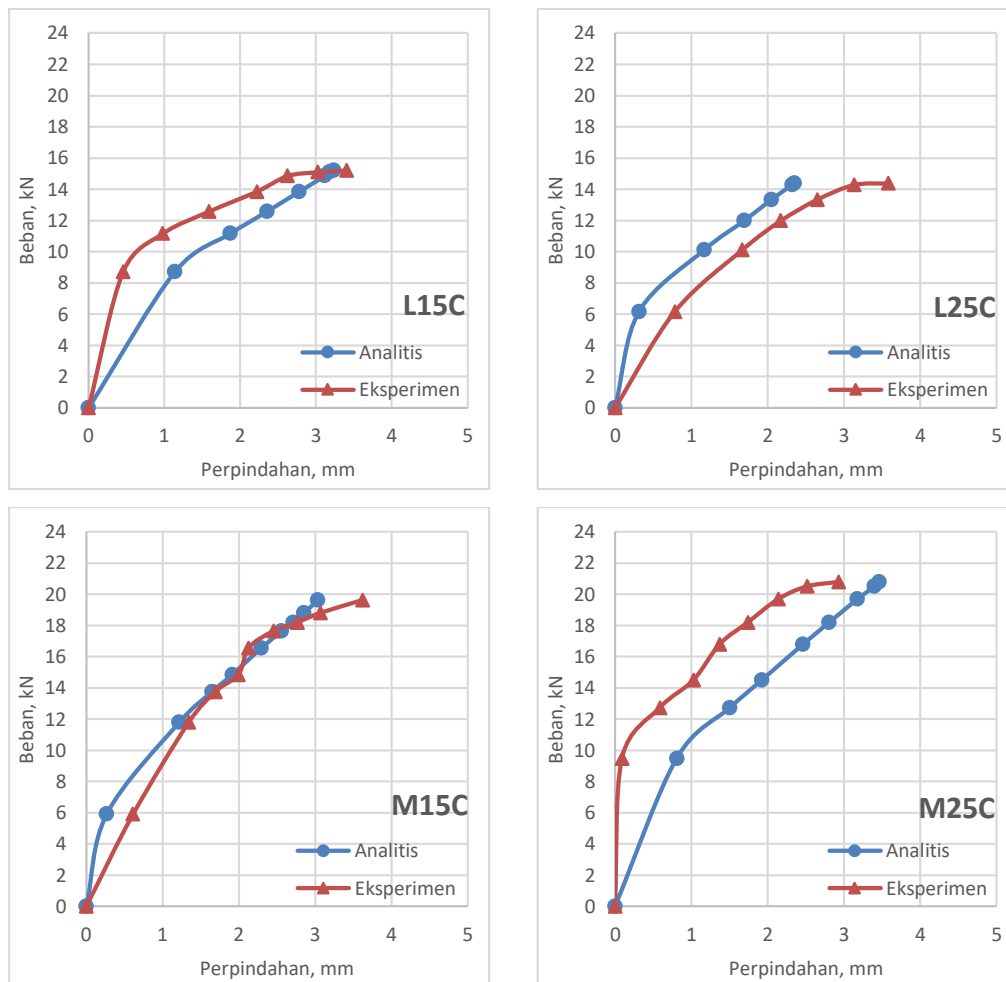
Perpindahan penetrasi leleh teoritis kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dihitung secara sederhana dengan mengurangi perpindahan lateral total dengan komponen perpindahan lentur dan komponen perpindahan geser.

$$\Delta_{yp} = \Delta_{LT} - \Delta_{lentur} - \Delta_{geser}$$

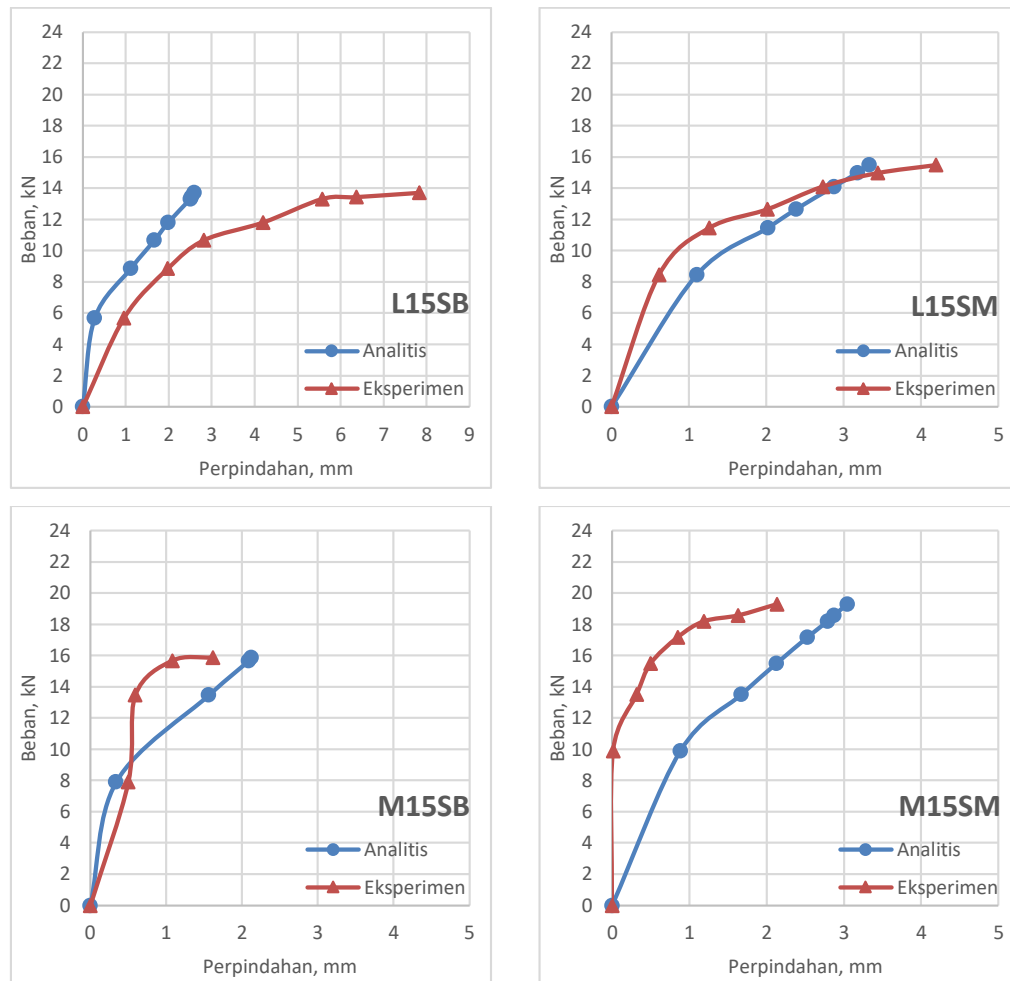
Grafik hasil perbandingan antara Δ_{yp} secara analitis dan Δ_{yp} hasil eksperimen ditunjukkan pada gambar 4.46 dan 4.47. Secara umum, model analitis menyediakan prediksi perpindahan *slip* yang konservatif untuk hampir semua spesimen dengan tulangan longitudinal menerus (gambar 4.46). Spesimen L25C merupakan pengecualian dimana perpindahan hasil eksperimen lebih besar dibandingkan perpindahan secara analitis, namun keduanya memiliki grafik yang identik dengan perbedaan hasil perpindahan yang tidak begitu besar. Perlu diperhatikan bahwa model simplifikasi hanya dibuat berdasarkan dua variabel,

yaitu rasio tulangan longitudinal dan rasio beban aksial, sehingga parameter rasio tulangan transversal sebenarnya tidak turut diperhitungkan. Namun dalam pengujian ini, spesimen memiliki kapasitas geser yang cukup untuk memenuhi *shear demand* bahkan dengan penambahan jarak sengkang, sehingga model analitis masih menunjukkan kinerja yang baik.

Sebaliknya, model analitis kurang memperlihatkan adanya kesinambungan dengan hasil eksperimental pada spesimen kolom dengan *lap splice* (gambar 4.47). Hal ini karena perbedaan perilaku akibat adanya *lap splice* tidak turut diperhitungkan dalam model analitis.



Gambar 4.45 Perbandingan perpindahan penetrasi leleh analitis dan eksperimental pada spesimen dengan variabel jarak sengkang



Gambar 4.46 Perbandingan perpindahan penetrasi leleh analitis dan eksperimental pada spesimen dengan variabel sambungan lewatan (*lap splice*)

Perpindahan penetrasi leleh bervariasi pada tiap spesimen, berkisar antara 19% hingga 70%. Spesimen dengan kontribusi perpindahan lateral paling dominan adalah kolom L15SB dan L15SM, sedangkan kontribusi perpindahan penetrasi leleh paling minimum dimiliki spesimen M15SM. Meskipun spesimen M15SB juga memiliki *lap slice* di daerah kritis, namun perpindahan yang dominan adalah akibat mekanisme lentur dan bukan akibat *slip* tulangan longitudinal. Spesimen M15SB dengan rasio tulangan longitudinal 1.1% runtuh lateral pada *drift* yang rendah akibat kegagalan *lap splice* di daerah kritis, maka perilaku yang sebenarnya diharapkan terjadi adalah terdapat kontribusi rotasi *slip* yang signifikan pada spesimen.

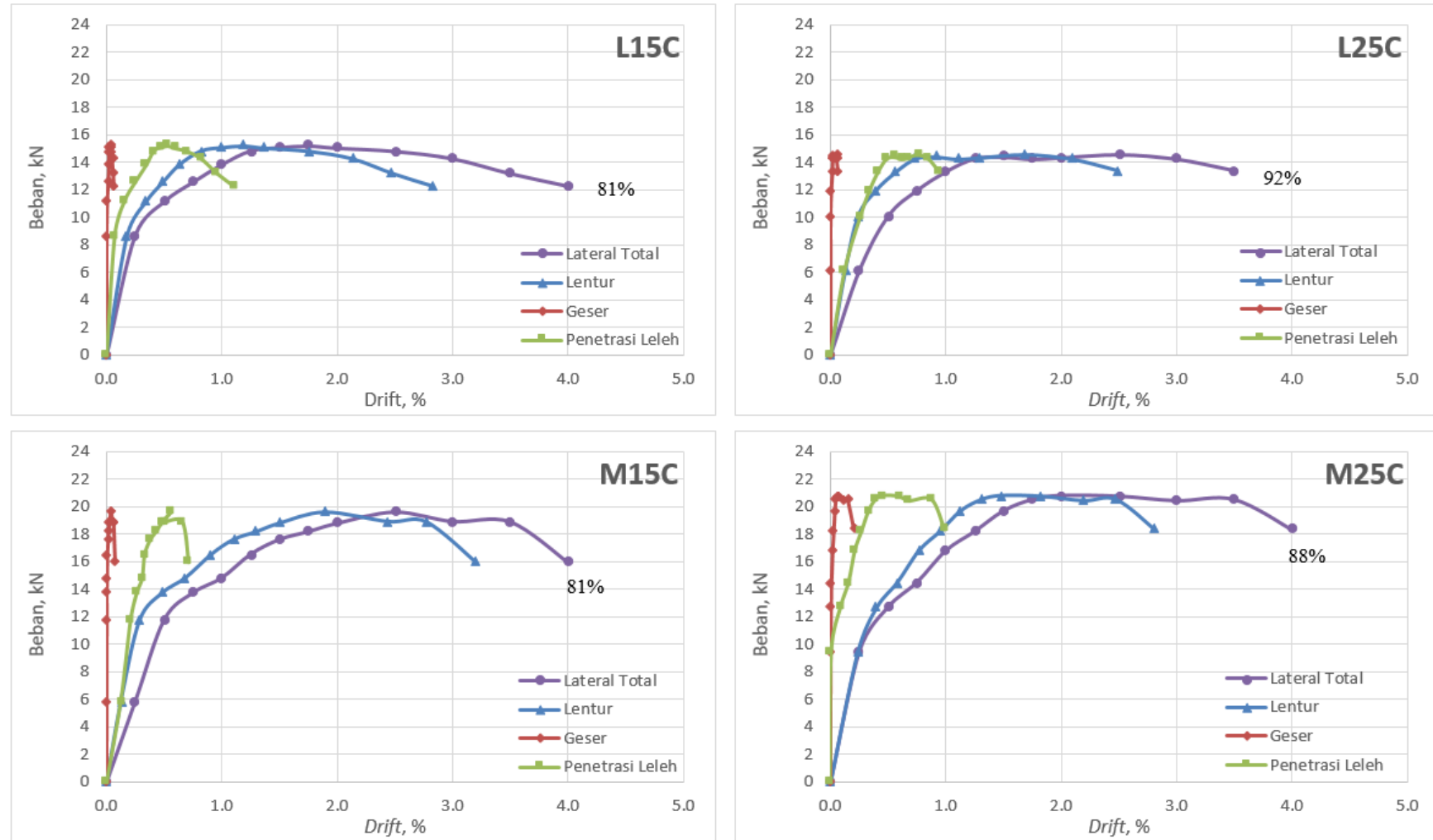
Kontribusi perpindahan penetrasi leleh lebih tinggi pada spesimen dengan rasio tulangan longitudinal (ρ_v) 0.8% dibandingkan spesimen dengan ρ_v 1.1% seperti terlihat pada tabel 4.14. Saat beton di sambungan balok-kolom telah mengalami retak akibat tarik, tegangan tarik diteruskan ke balok hanya melalui tulangan baja. Ketika akumulasi regangan tarik di daerah kritis tersebut ditahan oleh tulangan longitudinal dengan rasio yang rendah, deformasi *slip* tulangan longitudinal menjadi besar dan *gap opening* di sambungan balok-kolom juga akan semakin lebar. Sementara itu, penambahan jarak sengkang tidak memberikan pengaruh terhadap kontribusi perpindahan penetrasi leleh spesimen.

Dari hasil eksperimen, dapat disimpulkan pula bahwa penempatan sambungan lewatan tulangan longitudinal atau *lap splice* turut mempengaruhi kontribusi perpindahan penetrasi leleh spesimen kolom. Spesimen dengan sambungan di daerah kritis (spesimen L15SB dan M15SB) sangat rentan terhadap perpindahan penetrasi leleh, dimana *slip rotation* menyumbang porsi yang besar terhadap rotasi total spesimen. Spesimen L15SB dengan rasio tulangan longitudinal 0,8% menunjukkan performa simpangan yang baik dan dapat bertahan hingga *drift* 3,5%, menunjukkan meskipun terjadi *slip rotation* yang besar, sambungan kolom di daerah kritis masih dapat berfungsi hingga mencapai kekuatan lelehnya. Spesimen M15SB dengan rasio tulangan longitudinal 1,1% tidak berperilaku demikian dan gagal pada *drift* 2,5%, menunjukkan adanya kegagalan sambungan akibat *slip* di sepanjang tulangan. Spesimen dengan rasio tulangan dan atau kekuatan leleh lebih tinggi lebih rentan terhadap kegagalan *slip* karena adanya tegangan lekatan (*bond stress*) yang lebih tinggi di sepanjang sambungan (*splice*).

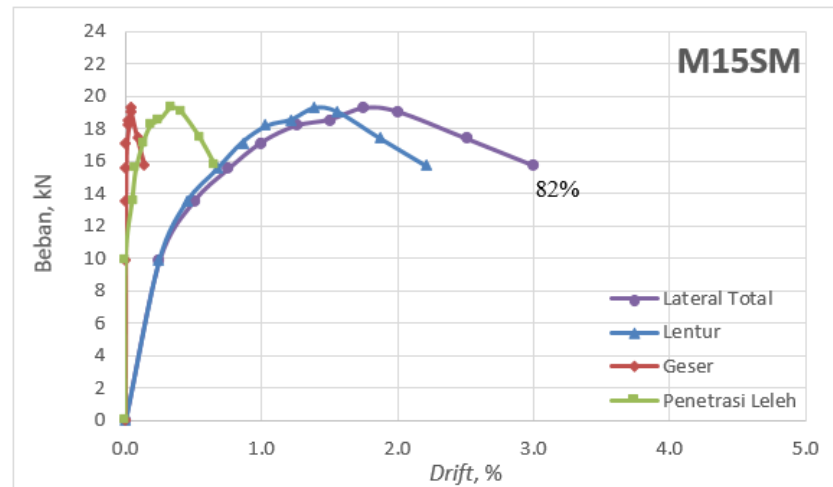
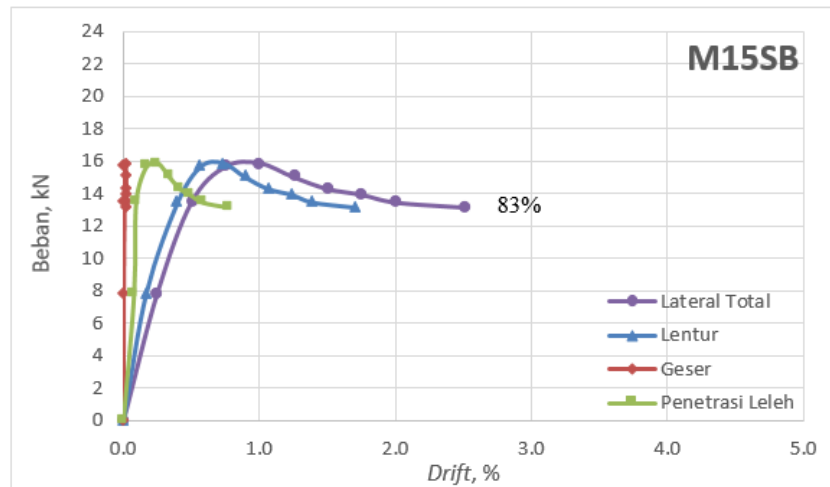
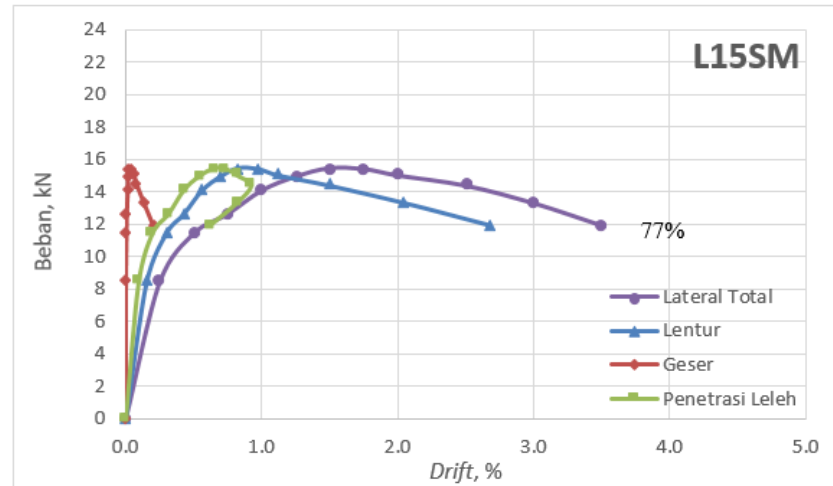
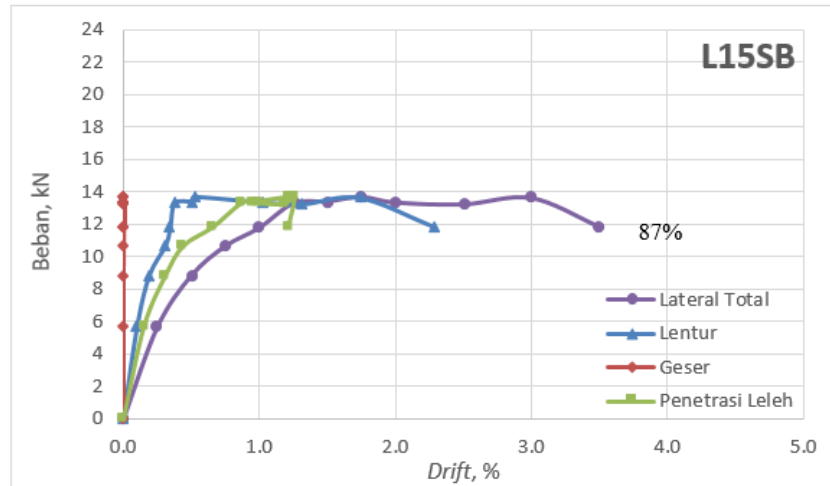
Spesimen dengan sambungan tulangan di luar daerah kritis (L15SM dan M15SM) memperlihatkan perilaku perpindahan leleh yang berbeda. Tingkatan *slip* saat beban lateral puncak spesimen L15SM cukup dominan hingga mencapai 44% sedangkan spesimen M15SM hanya dikisaran 19%. Bila menilik analisa kerusakan (sub bab 4.3), pada kondisi beban lateral puncak, bukaan atau *gap opening* di sambungan balok-kolom pada spesimen L15SM memang terlihat lebar, sedangkan pada spesimen M15SM bukaan yang lebar terlihat di retak lentur grid kedua dan bukan pada sambungan balok-kolom. Namun mendekati kegagalan lateral, bukaan

retak di sambungan balok-kolom spesimen L15SM mulai menutup sedangkan bukaan retak di grid kedua semakin melebar.

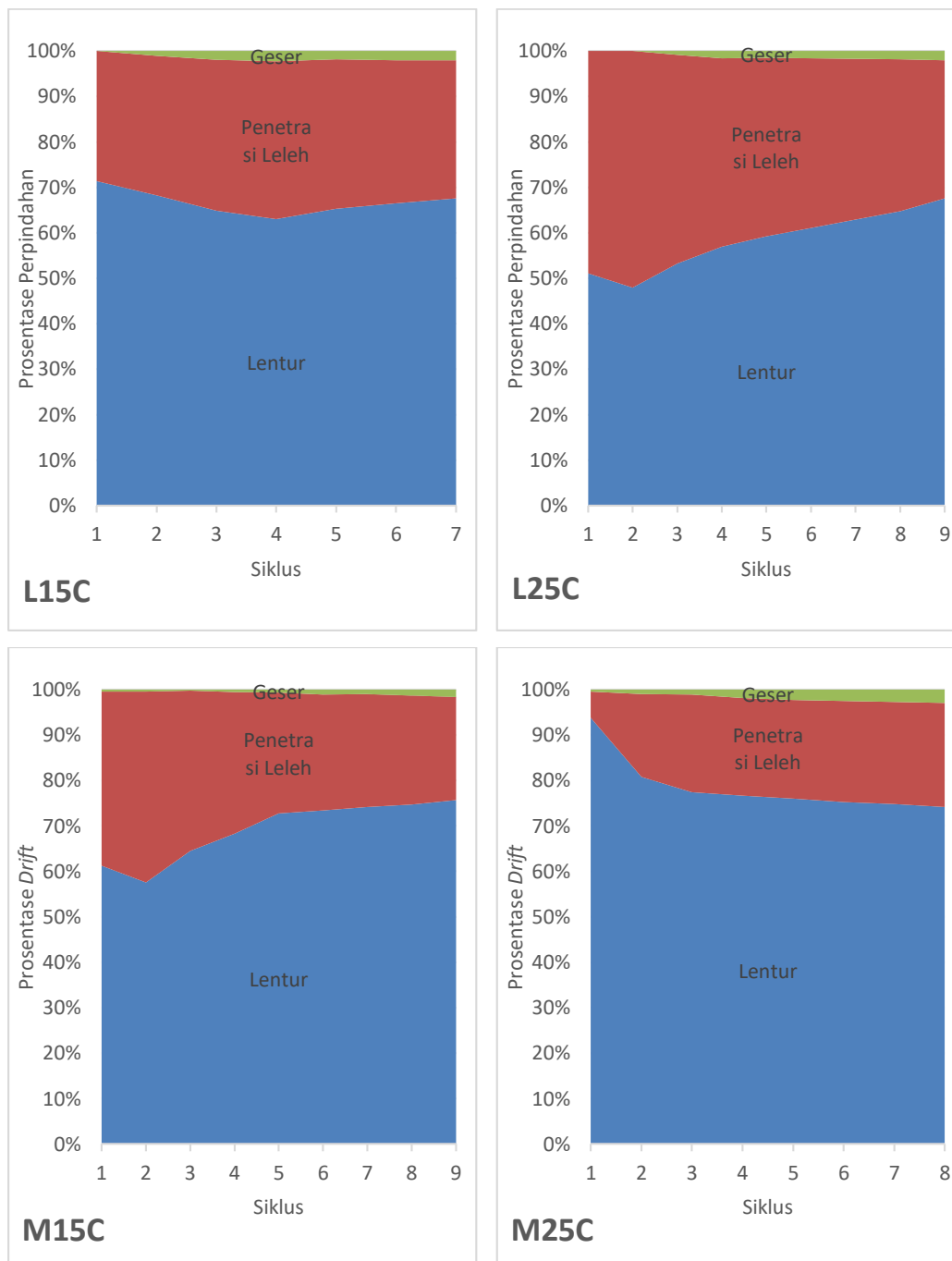
Penempatan sambungan lewatan di luar daerah kritis (di tengah kolom, lihat gambar 3.4 dan 3.5), namun dengan panjang sambungan kurang dari yang dibutuhkan untuk mencapai kekuatan lelehnya, menyebabkan adanya dua prediksi daerah kritis pada kolom, yaitu di sambungan balok-kolom (tempat momen terbesar) dan di tengah kolom (kemungkinan kegagalan kolom akibat *slip* di sepanjang sambungan). Hipotesa penulis adalah akibat adanya *lap splice* di bagian tengah kolom, maka bagian yang lemah tersebut menjadi lebih kaku (*stiffened considerably*) dan menaikkan kapasitas lentur di titik tersebut. Hal ini tidak baik karena dapat menyebabkan kebutuhan kekuatan yang tidak diinginkan (*unwanted demand of strength*) pada daerah di dekatnya (*adjacent region*). Daerah kerusakan kolom bergeser menjauhi sambungan balok-kolom dan cenderung mendekati letak sambungan lewatan. Kekakuan semakin meningkat seiring digunakannya rasio tulangan longitudinal yang lebih besar, menyebabkan bukaan retak lentur yang lebar di grid kedua pada spesimen M15SM.



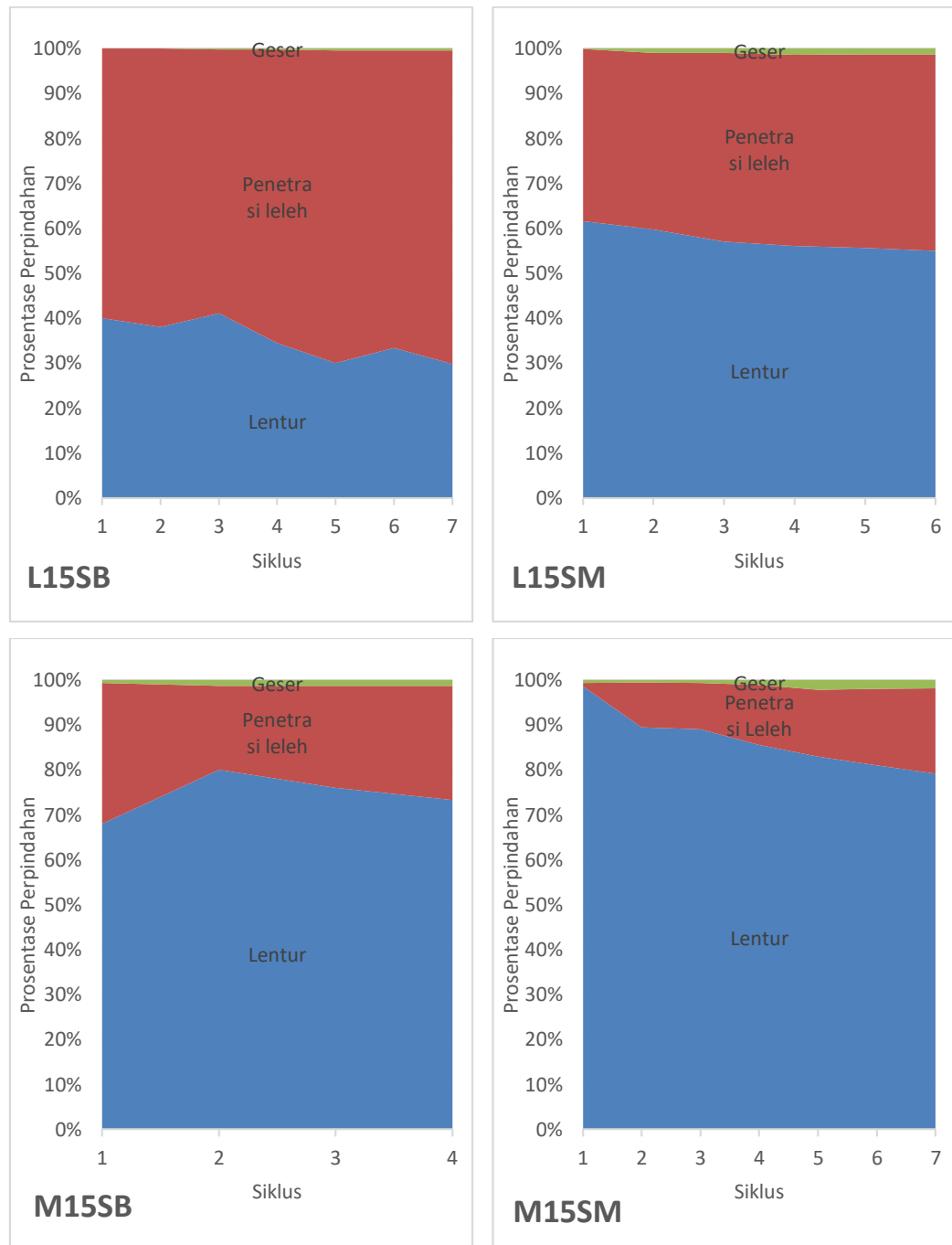
Gambar 4.47 Komponen perpindahan lentur, geser dan penetrasi leleh pada spesimen dengan variabel jarak sengkang



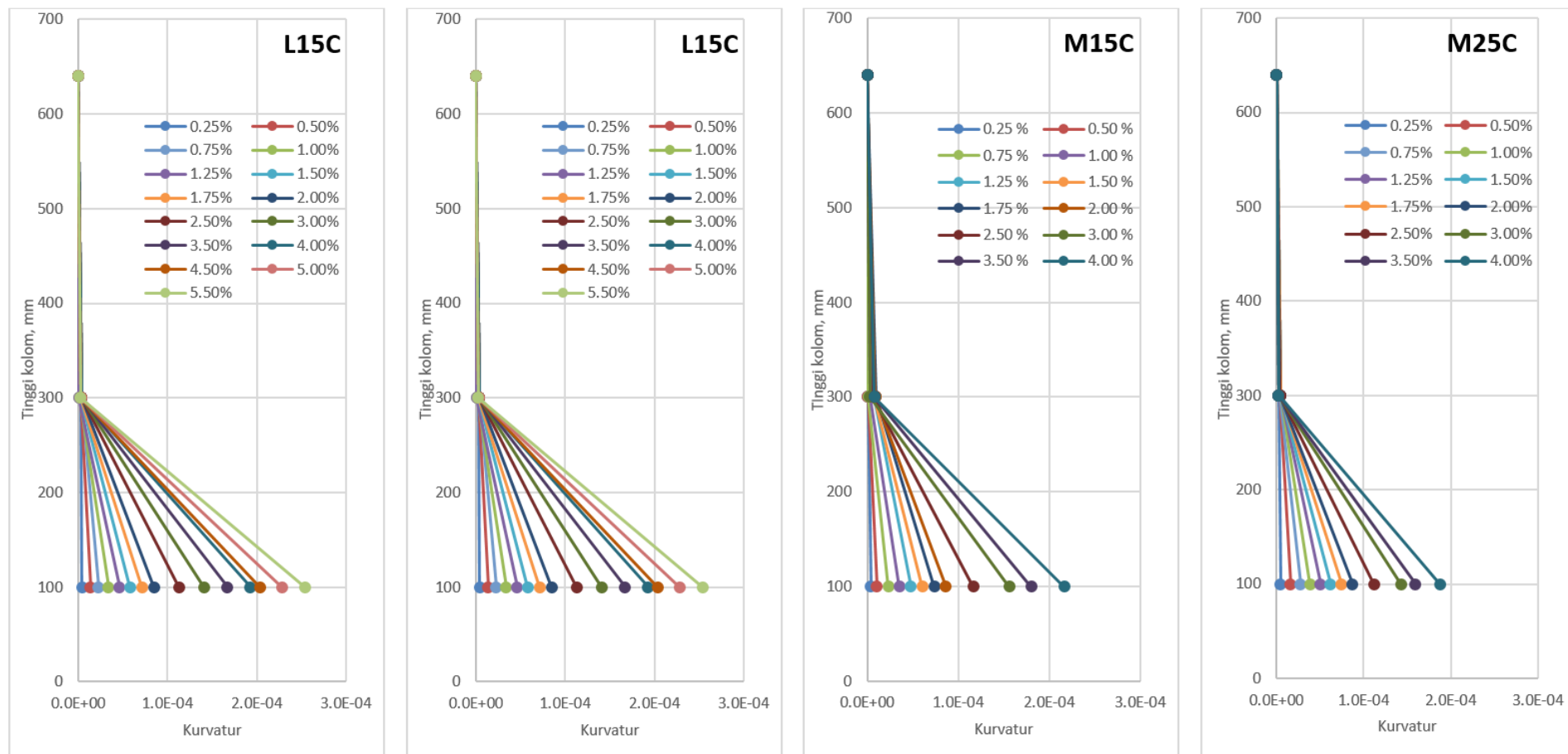
Gambar 4.48 Komponen perpindahan lentur, geser dan penetrasi leleh pada spesimen dengan variabel sambungan lewatan



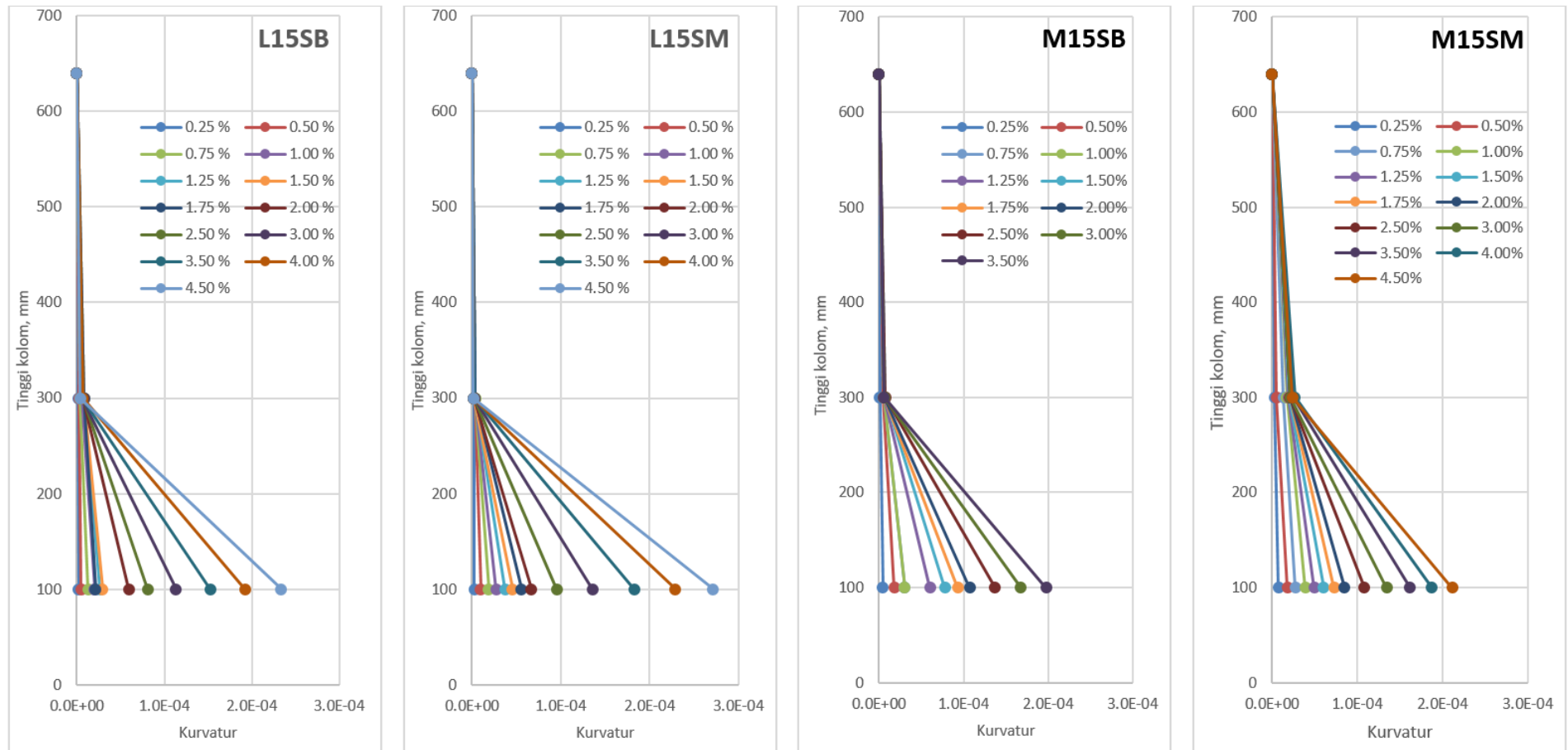
Gambar 4.49 Kontribusi komponen perpindahan lateral terhadap perpindahan lateral total pada spesimen dengan variabel jarak sengkang



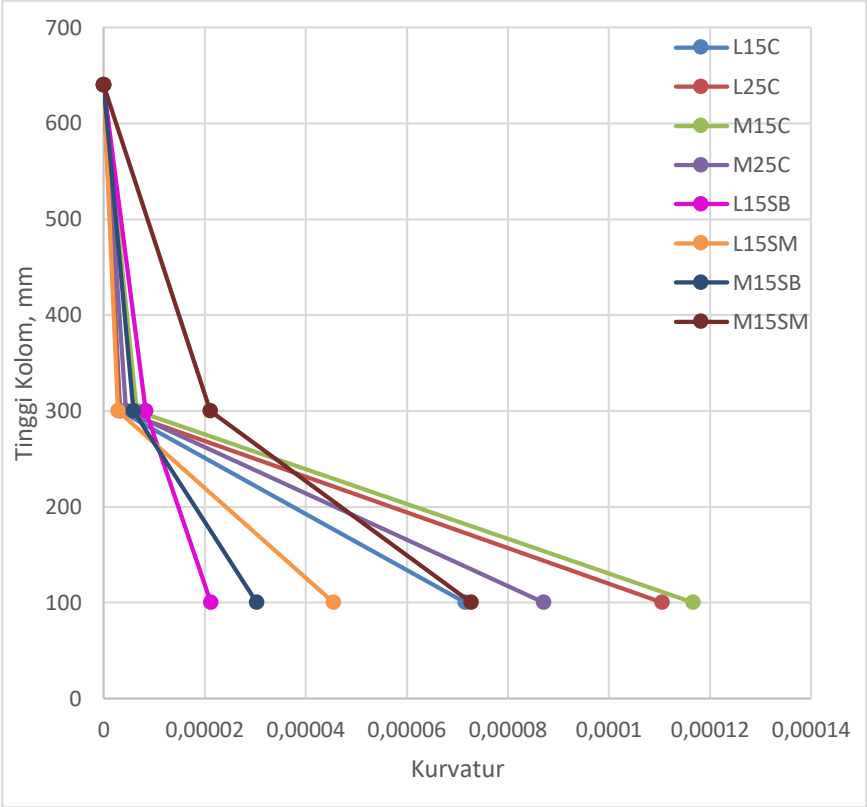
Gambar 4.50 Kontribusi komponen perpindahan lateral terhadap perpindahan lateral total pada spesimen dengan variabel sambungan lewatan



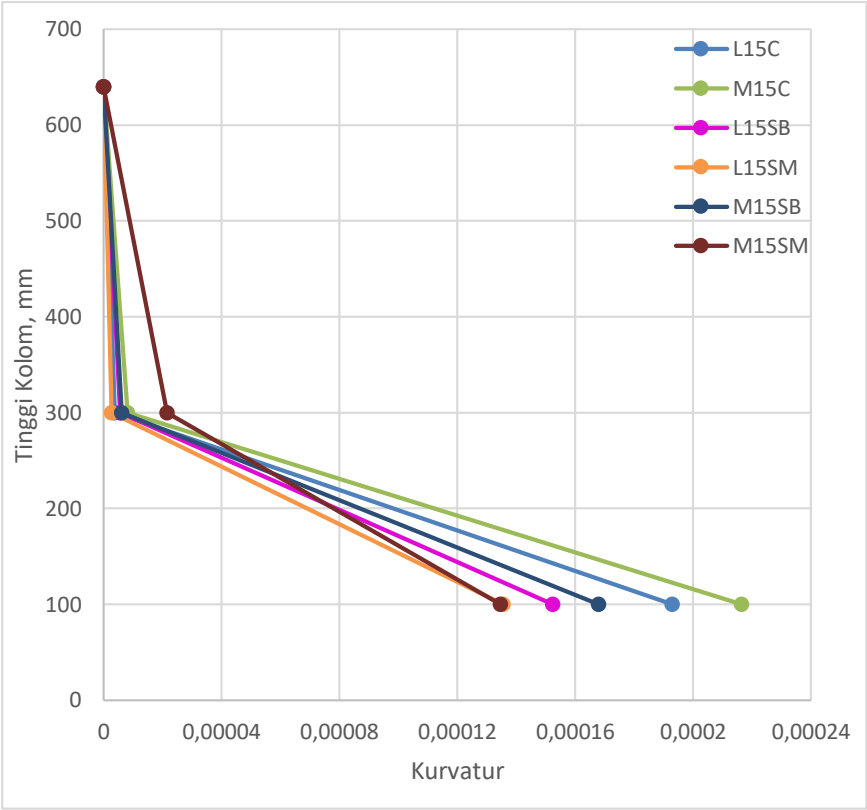
Gambar 4.51 Distribusi kurvatur di sepanjang tinggi kolom pada spesimen dengan tulangan menerus



Gambar 4.52 Distribusi kurvatur di sepanjang tinggi kolom pada spesimen dengan tulangan yang disambung (*spliced*)



Gambar 4.53 Perbandingan kurvatur spesimen pada kondisi beban puncak



Gambar 4.54 Perbandingan kurvatur spesimen pada kondisi kegagalan lateral

4.5 Kapasitas Lateral Spesimen Kolom

Tabel 4.17 menunjukkan hasil perbandingan antara kapasitas lentur hasil uji eksperimental dengan kapasitas lentur hasil perhitungan teoritis yang didapat dari analisa momen-kurvatur. Dapat terlihat bahwa perhitungan teoritis memberikan nilai kapasitas lentur yang konservatif untuk spesimen kolom dengan tulangan ringan (L15C dan L25C), yaitu kolom dengan rasio tulangan longitudinal yang kurang dari kebutuhan (*insufficient*) dan tulangan transversal tanpa detail yang daktail. Perhitungan teoritis juga cenderung memberikan nilai kapasitas lentur yang konservatif untuk spesimen kolom dengan sambungan lewatan (*splices*) di luar daerah kritis (L15SM dan M15SM).

Perilaku yang berbeda terjadi pada spesimen dengan sambungan lewatan di daerah kritis (L15SB dan M15SB). Kolom L15SB dengan $\rho_v=0,8\%$ masih dapat mempertahankan kekuatan lenturnya hingga mencapai 3% lebih tinggi dari kapasitas lentur ultimit (perhitungan mengasumsi digunakannya tulangan menerus), namun spesimen kolom M15SB dengan $\rho_v=1,1\%$ hanya dapat mencapai 86% dari kekuatan lentur ultimitnya sebelum tiba-tiba gagal di sambungan. Kapasitas lentur untuk kolom bertulangan ringan tanpa atau dengan sambungan lewatan di luar daerah kritis dapat diprediksi menggunakan analisa momen-kurvatur dan masih memberikan batas aman. Sedangkan adanya sambungan lewatan di daerah kritis mengurangi kapasitas lentur kolom secara signifikan, sehingga analisa momen-kurvatur tidak lagi bisa memprediksi secara aman kapasitas lentur spesimen.

Perilaku *drift*-beban lateral untuk spesimen dengan variabel jarak sengkang dan rasio tulangan longitudinal terlihat pada gambar 4.56. Peningkatan rasio tulangan longitudinal menyebabkan kenaikan kapasitas lentur kolom, namun penggunaan jarak sengkang yang lebih rapat tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan lentur kolom. Pengaruh detail sengkang yang lebih rapat (atau lebih daktail) adalah terhadap kekuatan geser kolom dan hampir tidak berkontribusi dalam kekuatan lentur kolom. Semakin lebar jarak sengkang maka kekuatan geser semakin menurun. Degradasi kekuatan lateral akan berdampak pada peningkatan deformasi geser dan deformasi total secara keseluruhan, dan dapat berujung pada kegagalan geser yang getas.

Penggunaan sambungan lewatan tulangan longitudinal serta posisi dari sambungan tersebut dapat mereduksi kapasitas lentur kolom secara signifikan. Kapasitas lentur puncak yang dicapai oleh tiap spesimen dengan sambungan lewatan serta rasio terhadap kapasitas lentur puncak yang dicapai oleh spesimen referensi (L15C dan M15C) tercantum pada tabel 4.17. Dapat terlihat bahwa momen puncak spesimen L15SM dan M15SM, masing-masing sangat mirip dengan spesimen L15C dan M15C, dengan rasio momen mendekati satu. Hal ini mengindikasikan bahwa perilaku lentur spesimen dengan sambungan lewatan di luar daerah kritis hampir sama dengan spesimen referensi dengan tulangan longitudinal menerus. Namun adanya sambungan lewatan di luar daerah kritis dengan *insufficient length* mereduksi kapasitas simpangan kolom dan meningkatkan kemungkinan perubahan mode kegagalan kolom dari *flexure failure* menjadi *flexure-shear failure* akibat degradasi kapasitas geser yang drastis setelah momen puncak tercapai (tabel 4.19).

Rasio momen menurun saat sambungan lewatan tulangan longitudinal diberikan di daerah kritis (dasar kolom), dan penurunan rasio momen semakin besar pada spesimen dengan rasio tulangan longitudinal yang lebih tinggi. Spesimen L15SB dengan $\rho_v=0,8\%$ mengalami penurunan momen sekitar 10% dari spesimen referensi, L15C. Sedangkan momen spesimen M15SB ($\rho_v=1,1\%$) menurun hingga 20% dibandingkan dengan spesimen referensi, M15C. Penggunaan rasio tulangan longitudinal yang lebih tinggi meningkatkan tegangan lekatan (*bond stress*) di sepanjang sambungan lewatan dengan *insufficient length*, menyebabkan terjadinya degradasi kekuatan lateral spesimen M15SB pada *drift* yang rendah.

Spesimen referensi, L15C dan M15C, masih dapat mempertahankan 80% kapasitas lateral puncak pada *drift* 4%. Namun, spesimen dengan sambungan lewatan, baik di luar maupun pada daerah kritis, mengalami degradasi kekuatan lateral yang tajam. Spesimen dengan sambungan lewatan di daerah kritis, L15SM ($\rho_v=0,8\%$), hanya mampu mempertahankan 73% kekuatan lateral puncak di *drift* 4%, sedangkan kekuatan lateral spesimen M15SM ($\rho_v=1,1\%$) menurun lebih tajam dan hanya tersisa 60% dari kekuatan lateral puncak di *drift* 4%. Demikian pula dengan spesimen dengan sambungan lewatan di daerah kritis. Kekuatan lateral spesimen L15SB tersisa 65% dari kekuatan lateral puncak di *drift* 4%. Pengujian

spesimen M15SB tidak dapat dilanjutkan hingga *drift* 4% karena ketidakmampuan alat pengujian, namun bila dibandingkan di *drift* 3%, spesimen referensi M15C masih memiliki 97% kekuatan lateral puncak, sedangkan spesimen M15SB sudah mengalami *lateral failure* dengan residu kekuatan lateral tidak lebih dari 78%.

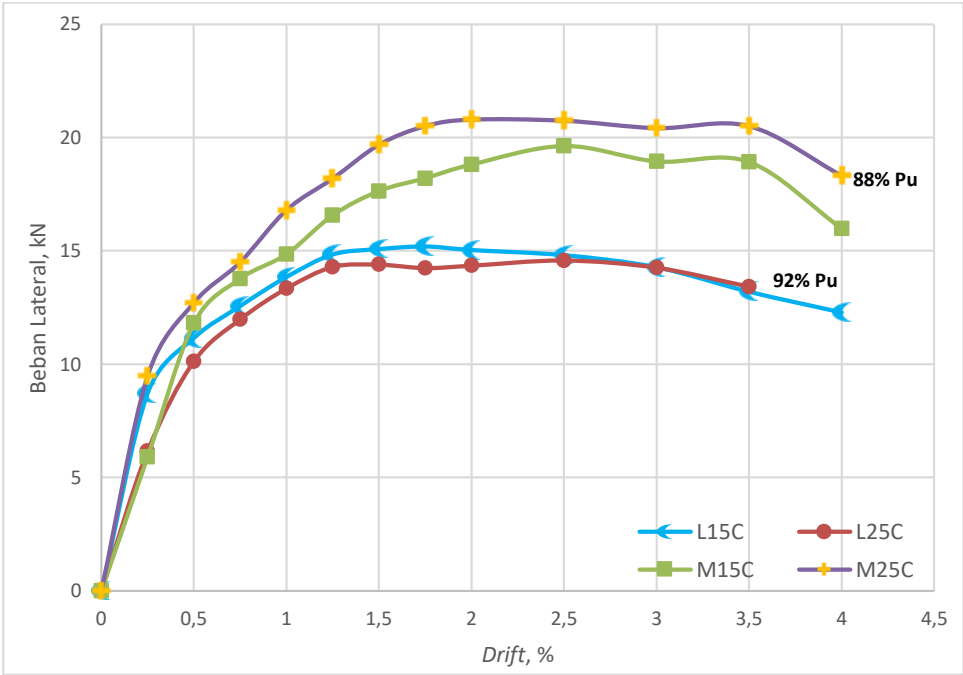
Spesimen bertulangan ringan dengan *insufficient lap splice* di luar daerah kritis mengalami penurunan kapasitas lateral yang lebih gradual dibandingkan spesimen dengan *insufficient lap splice* di daerah kritis, sedangkan peningkatan tulangan longitudinal dari 0,8% menjadi 1,1% berakibat kehilangan kapasitas lateral secara tiba-tiba (sekitar 16% dalam satu peningkatan *drift*) seiring penurunan kapasitas geser secara tajam, baik pada spesimen dengan *insufficient lap splice* di dalam atau di luar daerah kritis. Peningkatan rasio tulangan longitudinal dari 0,8% menjadi 1,1% juga berakibat pada reduksi kekuatan yang lebih signifikan di setiap siklusnya.

Tabel 4.17 Perbandingan antara kapasitas lentur eksperimen dan teoritis

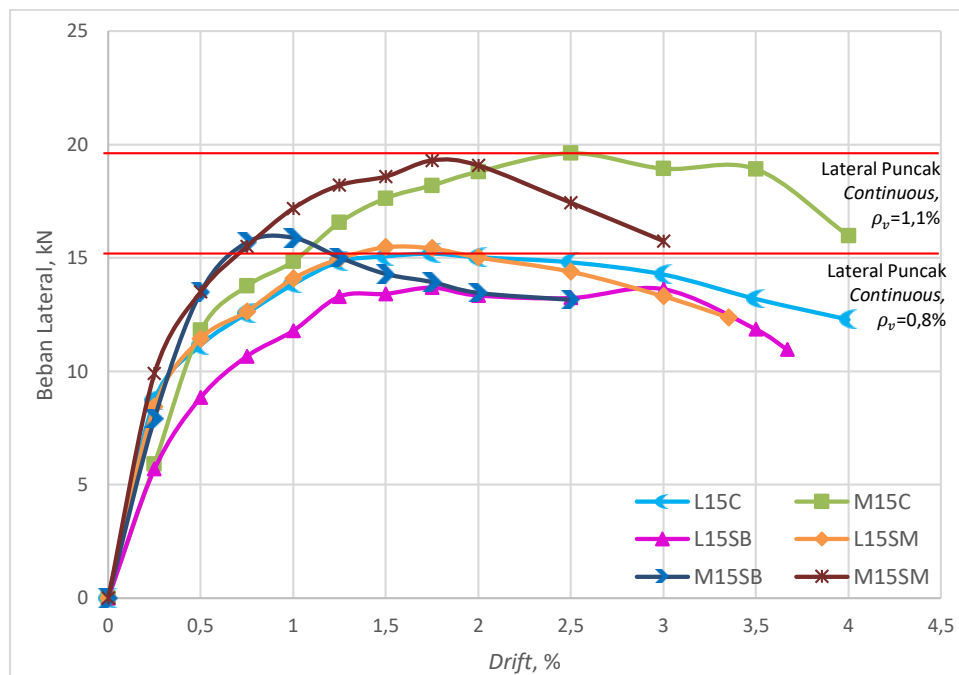
Spesimen	f'_c (MPa)	Kapasitas Lentur (kNm)		M_u (eksp) / M_u (teori)	M_u (eksp) <i>spliced</i> / M_u (eksp) <i>continuous</i>
		M_u (eksperimen)	M_u (teoritis)		
L15C	22.5	9.73	8.31	1.17	-
L25C	22.6	9.33	8.22	1.14	-
M15C	26.9	12.55	11.82	1.06	-
M25C	21.9	13.31	11.41	1.17	-
L15SB	25.2	8.76	8.44	1.04	0.90
L15SM	22.1	9.90	8.19	1.21	1.02
M15SB	25.4	10.17	11.70	0.87	0.81
M15SM	25.2	12.35	11.70	1.06	0.98

Tabel 4.18 Degradasi kekuatan lateral spesimen kolom di tiap peningkatan *drift*

<i>Drift</i>	<i>Lateral strength degradation (%)</i>					
	L15C	M15C	L15SB	L15SM	M15SB	M15SM
3,0%	93.95	96.52	99.53	86.04	77.99	81.56
3,5%	86.84	96.39	86.60	77.14	76.60	65.11
4,0%	80.84	81.42	65.04	72.84	-	59.09



Gambar 4.55 Kurva *drift*-beban lateral untuk spesimen dengan variabel jarak sengkang



Gambar 4.56 Kurva *drift*-beban lateral untuk spesimen dengan variabel sambungan lewatan tulangan longitudinal

4.6 Kapasitas Simpangan Spesimen Kolom

Rasio daktilitas digunakan untuk mendefinisikan performa kolom beton bertulang di bawah pembebanan siklik. Rasio daktilitas dihitung sebagai rasio antara *drift* maksimum kolom dengan *drift* leleh kolom. Dalam kasus ini, titik leleh ditentukan sebagai titik pertemuan antara perkiraan garis linear kurva beban-perpindahan pada fase elastis dengan garis horizontal saat beban lateral maksimum. Titik maksimum yang dimaksud ditentukan atas dua kondisi batas (*limit state*), yaitu kondisi beban lateral maksimum atau beban puncak dan kondisi kegagalan lateral (*lateral failure*), dimana kapasitas beban lateral sudah turun hingga mencapai 80% beban puncak.

Tabel 4.19 dan 4.20 merangkum daktilitas perpindahan pada delapan spesimen kolom. Kolom dengan rasio tulangan longitudinal 0,8% dan jarak sengkang 150 mm (jarak sengkang melebihi jarak minimum yang diperbolehkan) dibawah pembebanan aksial konstan 10% terbukti memiliki performa simpangan yang baik dan mampu mempertahankan kapasitas lenturnya hingga *drift* 1,75%. Peningkatan rasio tulangan longitudinal menjadi 1,1% menghasilkan rasio

daktilitas yang lebih kecil meskipun kapasitas puncak kolom tercapai di *drift* yang lebih tinggi akibat kolom mengalami leleh pada *drift* yang lebih tinggi pula.

Kekangan pada kolom yang cukup harus disediakan untuk meningkatkan kekuatan inti beton terkekang dan mendukung kolom saat luas penampang melintang mulai berkurang akibat *spalled* selimut beton, selain mencegah tertekuknya (*buckling*) tulangan longitudinal yang dapat menyebabkan kolom gagal secara tiba-tiba. Tulangan transversal memiliki efek untuk mereduksi *slope* dari *descending branch* kurva regangan-tegangan beton (Roy & Park), sehingga pemberian detail kekangan yang lebih baik diharapkan mampu meningkatkan daktilitas kolom secara keseluruhan. Dalam eksperimen ini, spesimen kolom didesain dengan *area transverse reinforcement ratio* 0,35% (untuk jarak sengkang 150 mm) dan 0,21% (untuk jarak sengkang 250mm), dimana masih lebih besar dari kebutuhan minimum tulangan transversal menurut SNI 03-2847-2002 sebesar 0,13%. Selain itu, hasil perhitungan kekuatan geser menyatakan bahwa sebenarnya spesimen kolom hanya perlu menggunakan tulangan geser minimum karena kebutuhan geser (V_u) telah lebih kecil dari setengah kapasitas geser nominal yang diberikan oleh beton ($\phi V_c/2$). Karenanya, pengaruh penambahan jarak sengkang pada kasus ini kemungkinan besar tidak akan berpengaruh terhadap kapasitas simpangan dan daktilitas kolom hingga *lateral expansion* beton cukup besar untuk menimbulkan tegangan yang signifikan pada sengkang, dimana baru akan terjadi pada *drift* yang tinggi, terlebih pada kolom dengan *low axial load ratio*.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan rasio volume tulangan transversal dari 0,36% menjadi 0,61% tidak memberikan pengaruh kapasitas *drift* yang signifikan, dan ini terjadi baik pada spesimen dengan rasio tulangan longitudinal 0,8% maupun 1,1%. Seperti terlihat pada gambar 4.55, kurva beban lateral-*drift* spesimen L15C dengan L25C dan M15C dengan M25C cenderung sama, dimana kedua kolom memiliki daktilitas yang baik dan mampu berotasi inelastis tanpa penurunan kapasitas lateral yang berarti. Seperti telah dijabarkan sebelumnya, hal ini kemungkinan akibat tulangan transversal yang pada dasarnya merupakan kekangan pasif, sehingga ia baru akan bekerja ketika regangan beton telah cukup besar, dan hal ini baru terjadi di *drift* yang tinggi. Spesimen dengan jarak sengkang yang lebih lebar (250 mm) tidak dapat diuji hingga *drift* yang tinggi

karena ketidakmampuan alat pengujian. Diperkirakan tulangan transversal sebenarnya belum bekerja pada titik tersebut, menyebabkan tidak adanya perbedaan antara kedua spesimen dengan jarak sengkang yang berbeda. Namun perlu diperhatikan bahwa terjadi perbedaan kontribusi perpindahan geser pada spesimen dengan rasio tulangan longitudinal 1,1%, dimana spesimen kolom M15C (jarak sengkang 150 mm) memiliki kontribusi perpindahan geser dengan porsi yang lebih kecil dibandingkan spesimen M25C (jarak sengkang 250 mm). Selain itu, spesimen M25C menunjukkan adanya perilaku geser yang lebih menonjol, ditunjukkan dengan terbentuknya retak diagonal yang saling menyilang di area sendi plastis. Hal tersebut membuktikan deformasi geser dapat meningkat dengan penambahan jarak sengkang, yang secara langsung mereduksi kapasitas geser kolom dan berujung pada keruntuhan kolom yang getas.

Spesimen kolom bertulangan ringan dengan sambungan lewatan, baik di dalam atau di luar daerah kritis, memiliki performa daktilitas yang cukup baik, meskipun masih di bawah daktilitas spesimen referensi, L15C. Spesimen L15SB dan L15SM masing-masing gagal di *drift* 3,67% dan 3,35%, hampir sama dengan L15C yang gagal di *drift* 4,0%. Kedua spesimen ini mengalami bukaan retak yang cukup lebar dan *excessive spalling* di kedua sisi kolom namun ternyata masih mampu mempertahankan kapasitas lateralnya hingga *drift* yang tinggi. Di lain pihak, spesimen M15SB dan M15SM gagal lateral di daktilitas yang lebih tinggi dari spesimen M15C, meskipun *peak drift* yang lebih kecil tercapai. Spesimen M15SB dan M15SM masing-masing gagal di *drift* 2,5% dan 3,0%, jauh dibawah spesimen M15C yang gagal di *drift* 4,0%.

Tabel 4.19 Nilai rasio daktilitas spesimen kolom pada kondisi beban puncak

Spesimen	<i>Yield Drift</i>	<i>Ultimate Drift</i>	<i>Ductility Ratio</i>
L15C	0.70	1.75	2.48
L25C	0.78	2.50	3.22*
M15C	1.29	2.50	1.93
M25C	1.15	2.00	1.74
L15SB	0.91	1.75	1.93
L15SM	0.69	1.50	2.17
M15SB	0.55	1.00	1.83
M15SM	0.81	1.75	2.17

*) Nilai daktilitas yang tinggi terjadi akibat beban cenderung konstan pada beberapa peningkatan siklus sebelum akhirnya turun.

Tabel 4.20 Nilai rasio daktilitas spesimen kolom pada kondisi kegagalan lateral

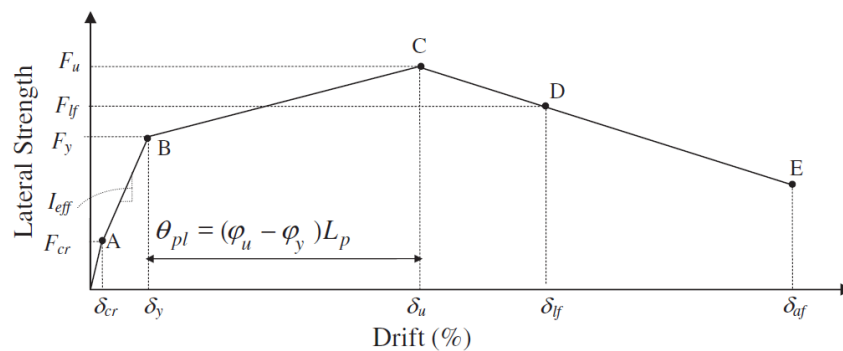
Spesimen	<i>Yield Drift</i>	<i>Lateral Failure Drift</i>	<i>Ductility Ratio</i>
L15C	0.70	4.00	5.68
M15C	1.29	4.00	3.09
L15SB	0.91	3.67	4.05
L15SM	0.69	3.35	4.85
M15SB	0.55	2.50	4.58
M15SM	0.81	3.00	3.72

4.7 Model Simplifikasi Kurva Beban-Perpindahan

Dalam mendesain komponen kolom untuk bangunan tahan gempa, perlu diketahui perilaku *drift* kolom tersebut dalam menahan beban lateral siklik, baik pada fase elastis maupun fase inelastis. Wibowo (2010) mengembangkan dua model kurva hubungan beban-perpindahan, yaitu *backbone curve model* dan *bi-linear curve model*, untuk memprediksi perilaku beban-perpindahan serta kapasitas *drift* dari kolom bertulangan ringan atau *limited ductile column*. Kedua model tersebut memperhitungkan tiga desain parameter, yaitu rasio beban aksial, rasio

tulangan longitudinal dan rasio tulangan transversal. Dalam sub-bab ini, penulis membandingkan hasil pemodelan *backbone curve* dan *bi-linear curve* dengan hasil eksperimental kurva beban-perpindahan untuk spesimen kolom bertulangan ringan dengan *splice*.

Backbone curve model terbentuk atas 4 garis linier dengan lima titik kondisi batas, yaitu retak, leleh, kekuatan puncak, kegagalan beban lateral (*lateral load failure*) dan kegagalan beban aksial (*axial load failure*). *Drift* saat kegagalan beban aksial penting untuk diketahui karena menurut investigasi pasca-gempa yang dilakukan oleh Wibowo (2013), penyebab utama keruntuhan bangunan beton bertulang selama gempa adalah akibat hilangnya kapasitas penahan beban aksial (*loss of axial load carrying capacity*) pada komponen bangunan yang kritis daripada akibat reduksi kapasitas beban lateral.

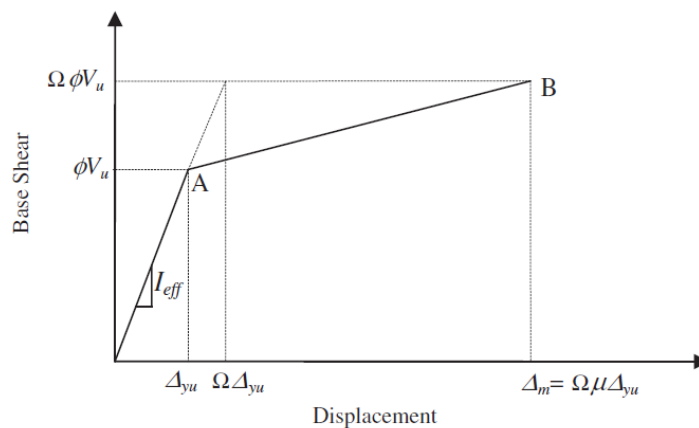


Gambar 4.57 Model backbone load-drift curve

Seperti tertera dalam sub-bab 2.11.1, *drift* dan beban lateral saat retak (titik A), leleh (titik B) serta kapasitas puncak (titik C) dari *backbone curve*, masing-masing dapat dengan sederhana dihitung menggunakan mekanika dasar dan analisa klasik metode tegangan kerja (*working stress method*). Kekuatan lateral saat keruntuhan beban lateral diambil sebesar 80% kekuatan lateral puncak, sedangkan *drift* keruntuhan lateral dihitung dengan rumus 2.51 yang telah dikembangkan oleh Wibowo (2012). *Drift* keruntuhan lateral merupakan titik kurva kekuatan geser terdegradasi saat kapasitas lateral kolom bernilai 80% kapasitas lateral puncak (gambar 2.28). Kekuatan geser awal (tak terdegradasi) diperoleh dengan menjumlahkan kekuatan geser yang disediakan oleh beton dan tulangan transversal.

Slope kurva kekuatan geser terdegradasi adalah fungsi dari rasio beban aksial dan *aspect ratio*, dimana kemiringan kurva semakin tajam seiring peningkatan kedua parameter tersebut. Titik terakhir (titik E), yaitu *drift* kegagalan aksial, dihitung menggunakan persamaan empiris (rumus 2.52) yang didasarkan pada 12 penelitian dengan 43 spesimen uji (Wibowo, 2012). Seperti terlihat pada rumus 2.52, *drift* kegagalan aksial akan bertambah dengan peningkatan rasio tulangan longitudinal (ρ_v) dan rasio luas tulangan transversal (ρ_h), sedangkan akan menurun ketika rasio beban aksial (n) mendekati atau melebihi *balance point* dari diagram interaksi. Variabel β mengakomodasi pengaruh rasio beban aksial terhadap komponen rasio tulangan longitudinal, dimana hubungan ρ_v dan n berbanding lurus ketika n mendekati rasio beban aksial di *balance point* (n_b) dan berbanding terbalik saat nilai n lebih kecil.

Selain *backbone curve*, Wibowo (2012) juga telah mengembangkan *simplified bilinear curve* untuk mengakomodasi estimasi perpindahan beban lateral puncak yang cepat dan konservatif pada tahap awal pengecekan performa gempa. Kurva bilinear hanya terdiri dari dua titik, yaitu titik leleh dan titik lateral puncak (gambar 4.58). Yang penting dalam model ini adalah penggunaan *ductility factor* (μ) dan *overstrength factor* (Ω), dimana untuk kolom bertulangan ringan (*lightly reinforced column*) nilai kedua factor tersebut dapat diasumsikan $\mu = 2$ dan $\Omega = 1.3$. *Overstrength factor* merepresentasikan kemampuan struktur untuk mencapai kapasitas puncak setelah kondisi leleh. Nilai perpindahan maksimum bisa dihitung dengan mengkalikan nilai perpindahan leleh dengan *ductility factor* dan *overstrength factor*.



Gambar 4.58 Model simplified bilinear curve

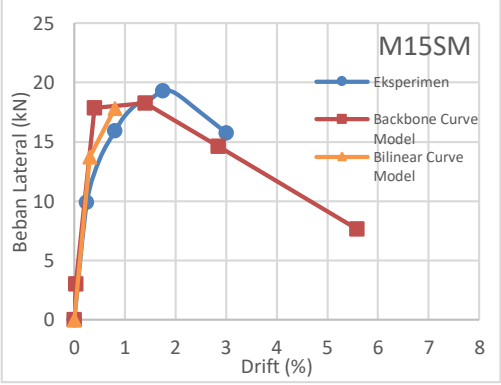
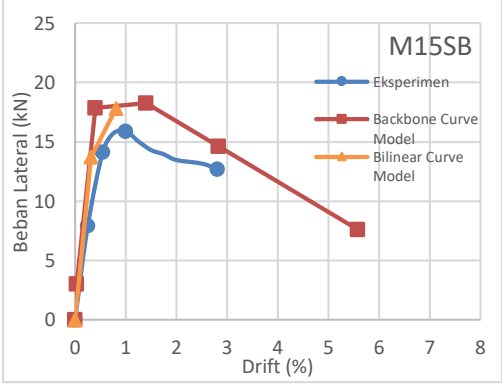
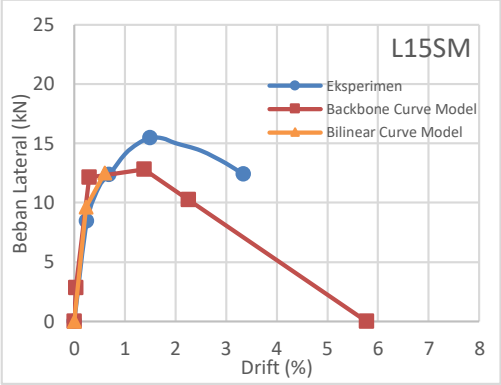
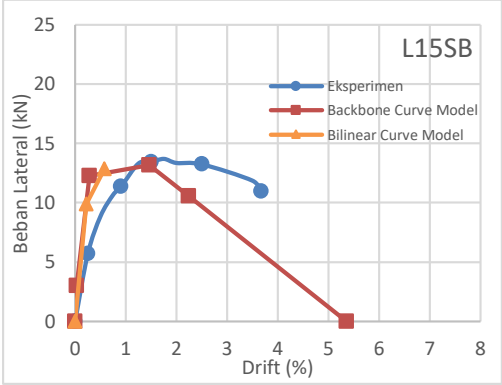
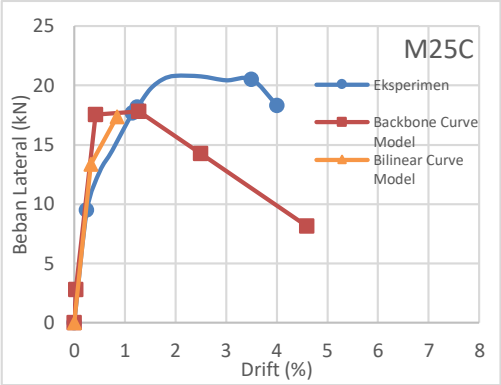
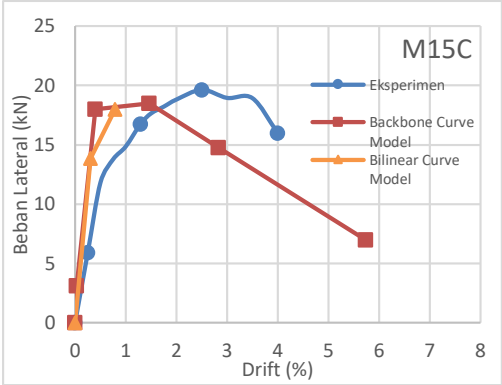
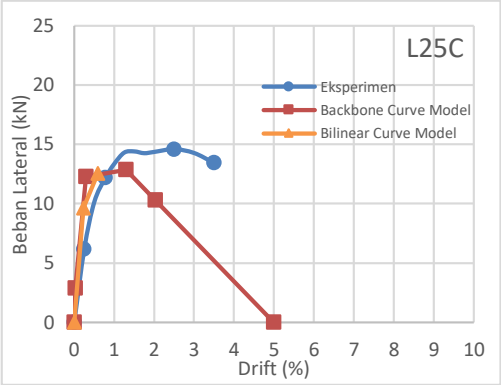
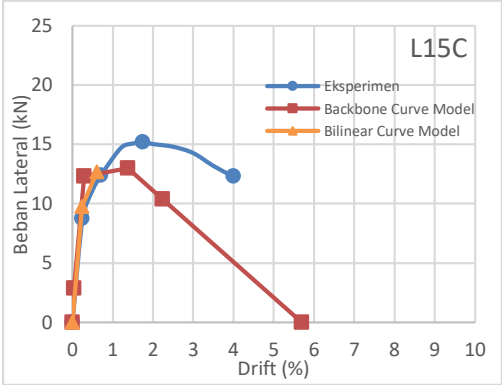
Untuk mengevaluasi performa *backbone curve* dan *bilinear curve* terhadap hasil kurva eksperimental, dilakukan studi kasus terhadap 26 kolom dari berbagai jurnal (tabel 4.21). Kolom yang digunakan memiliki rentang rasio tulangan longitudinal antara 0,8% hingga 2,6%, dan rentang rasio tulangan transversal antara 0,1% hingga 0,6%. Spesimen kolom terdiri dari dua tipe, yaitu kolom dengan tulangan longitudinal yang menerus (*continuous*) dan kolom dengan sambungan lewatan tulangan longitudinal, sehingga dapat diketahui pengaruh sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap keakuratan model. Spesimen kolom yang dipilih memiliki panjang sambungan lewatan yang bervariasi, dari 24 d_b sampai dengan 45 d_b .

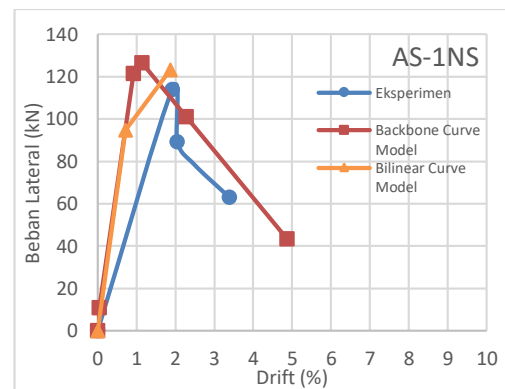
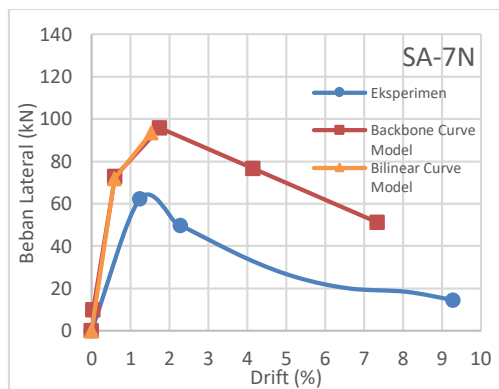
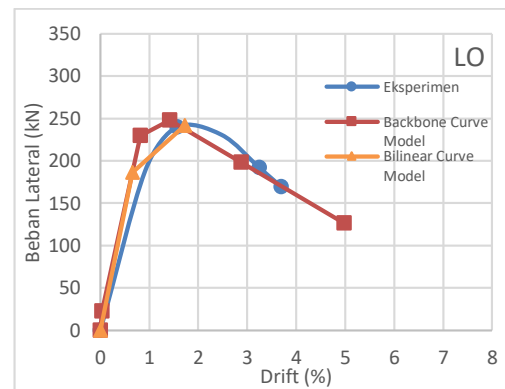
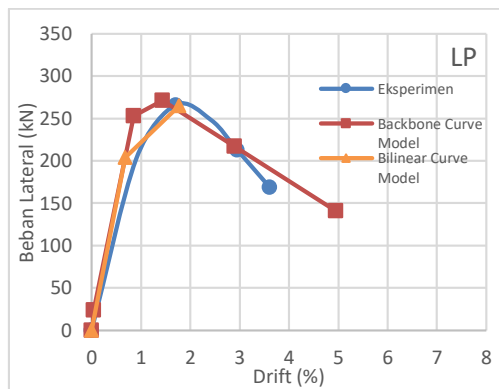
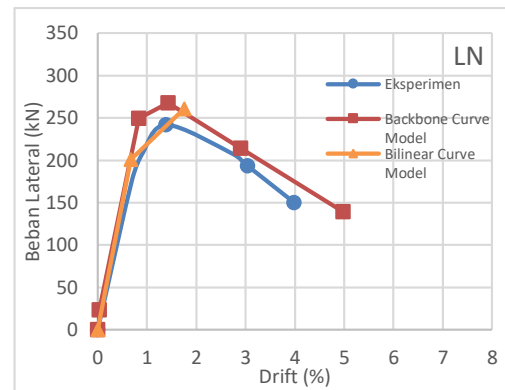
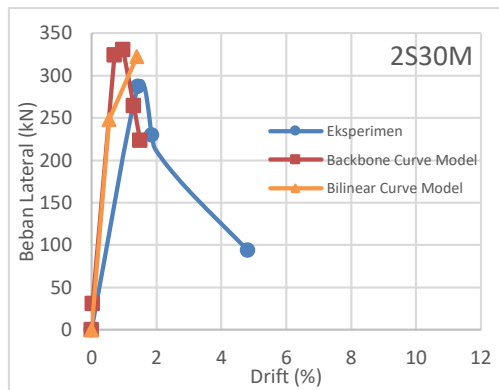
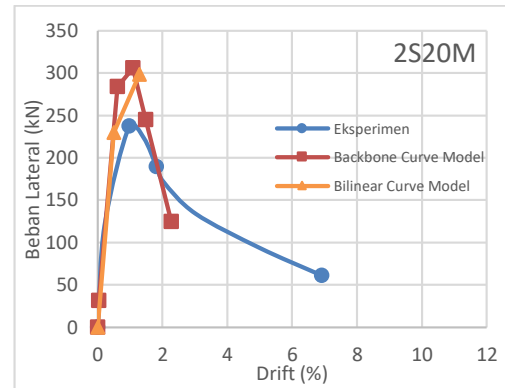
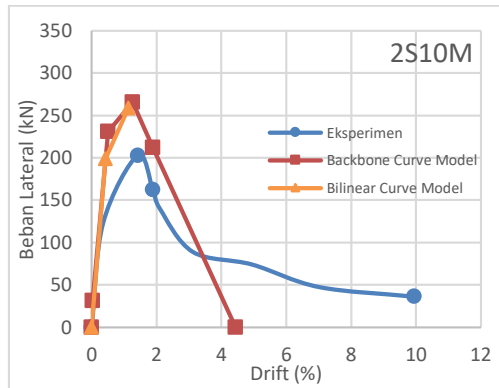
Tujuan utama pendekatan analitis metode kurva *backbone* dan *bilinear* adalah untuk menghasilkan kurva *backbone* dan kurva *bilinear* yang memiliki korelasi tren yang baik serta mampu memodelkan aspek penting respon, termasuk di dalamnya kondisi ultimate dan kekuatan residu saat kegagalan lateral dan kegagalan aksial, secara konservatif untuk keperluan desain berdasarkan performa (*perform based design*). Gambar 4.59 menspesifikasi hasil analitis dan eksperimental untuk spesimen kolom pada tabel 4.21. Spesimen kolom dengan aspek rasio lebih dari tiga (*flexure dominated*) yang dikenakan beban aksial rendah ($n \leq 20\%$) cenderung berada dalam korelasi yang baik (*good agreement*) dengan kurva hasil eksperimental, sedangkan kolom dengan aspek rasio kurang dari tiga (*shear dominated*) atau kolom dengan beban aksial yang mendekati titik seimbang (*balanced point*) menunjukkan hasil korelasi yang dapat diterima (*reasonable agreement*), dimana tren model masih menunjukkan hasil yang konservatif.

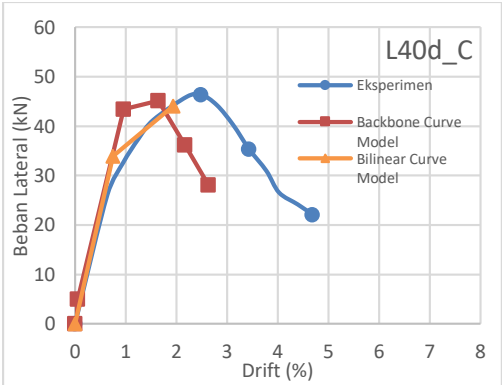
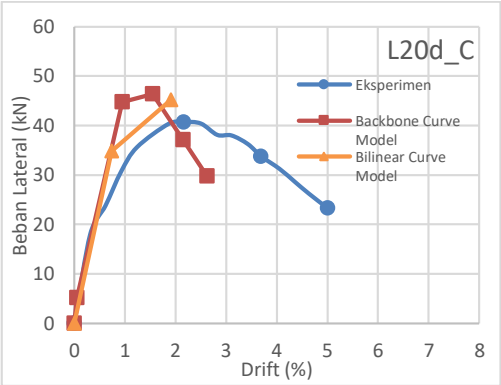
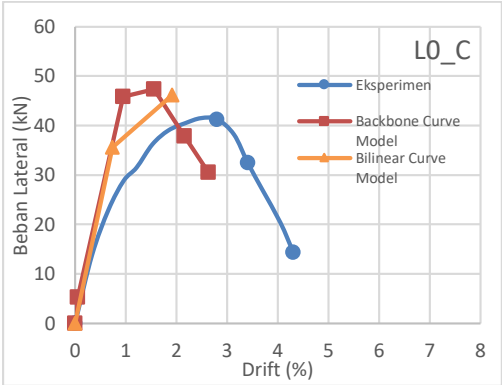
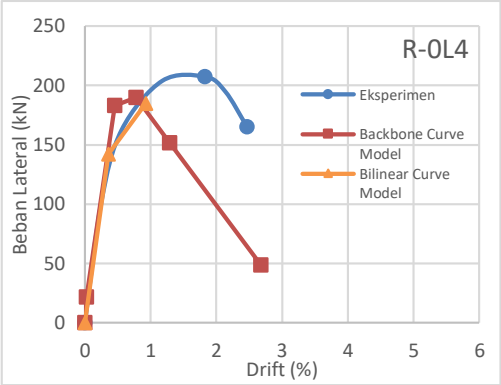
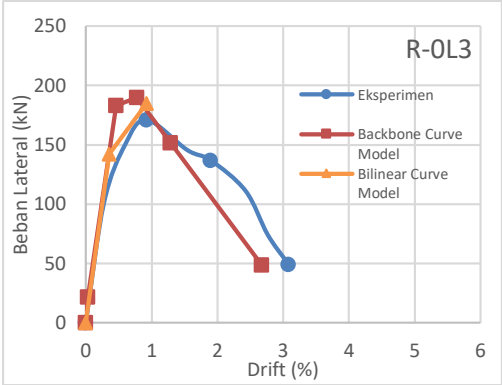
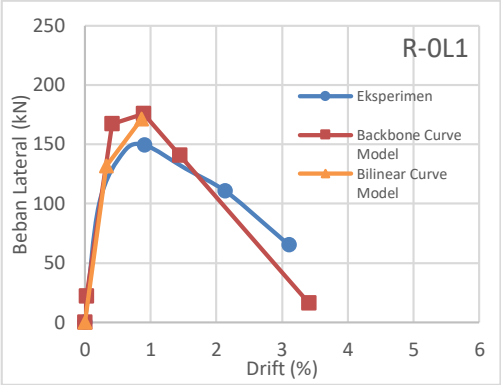
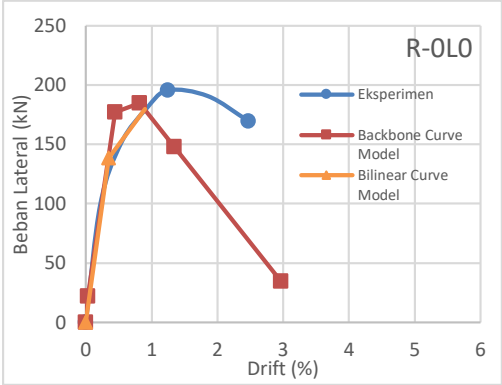
Tabel 4.21 Parameter spesimen kolom yang digunakan dalam studi kasus

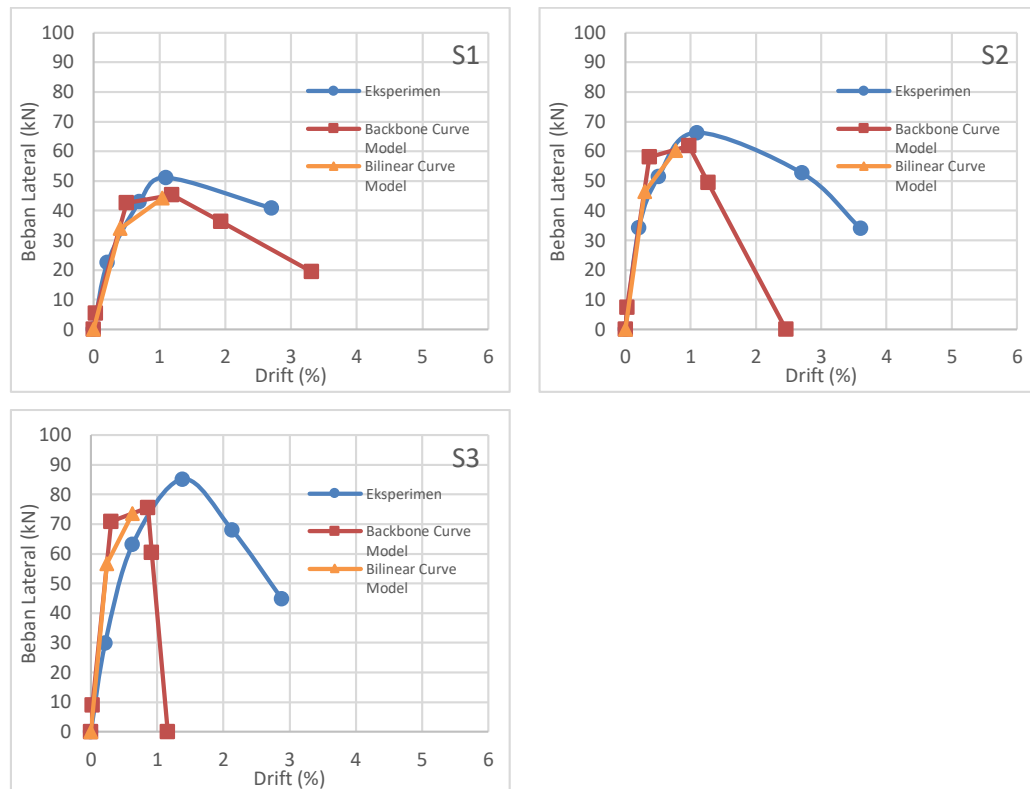
Specimen	Type	B (mm)	D (mm)	d (mm)	L (mm)	a (mm)	a/d	Lap Splice Length	Lap Splice Position	Diameter bar (mm)	ρ_v (%)	ρ_h (%)	s (mm)	f _c (MPa)	f _{yl} (MPa)	f _{yh} (MPa)	P (kN)	Axial load ratio (%)
MELEK & WALLACE																		
2S10M	SC	457.2	457.2	396	1829	1829	4.0	20 db	Bottom	25.4	2.0	0.12	304.8	36	510	481	753	10.0
2S20M	SC	457.2	457.2	396	1829	1829	4.0	20 db	Bottom	25.4	2.0	0.12	304.8	36	510	481	1505	20.0
2S30M	SC	457.2	457.2	396	1829	1829	4.0	20 db	Bottom	25.4	2.0	0.12	304.8	36	510	481	2258	30.0
PAM & HO																		
LN	SC	325	325	292	1640	1515	4.7	-	-	16	1.5	0.54	150	109.4	572	367	2427	21.0
LP	SC	325	325	292	1640	1515	4.7	30 db	Bottom	16	1.5	0.54	150	107.9	572	367	2371	20.8
LO	SC	325	325	292	1640	1515	4.7	30 db	Middle	16	1.5	0.54	150	97	572	367	2131	20.8
GHOSH & SHEIKH																		
SA-7N	SC	305	305	271	1470	1470	4.8	24 db	Bottom	19.5	2.6	0.31	150	26.6	400	410	124	5.0
AS-1NS	SC	305	305	271	1470	1470	4.8	-	-	19.5	2.6	0.61	150	31.4	400	410	964	33.0
BOUSIAS, et al.																		
R-0L0	SC	250	500	468	1600	1600	3.2	-	-	18	0.8	0.20	200	31	514	425	1007.5	26.0
R-0L1	SC	250	500	468	1600	1600	3.2	15 db	Bottom	18	0.8	0.20	200	18	514	425	517.5	23.0
R-0L3	SC	250	500	468	1600	1600	3.2	30 db	Bottom	18	0.8	0.20	200	18	514	425	630.0	28.0
R-0L4	SC	250	500	468	1600	1600	3.2	45 db	Bottom	18	0.8	0.20	200	18	514	425	630.0	28.0

BOURNAS & TRIANTAFILLOU																		
L0_C	SC	250	250	225	1600	1600	6.4	-	-	14	1.0	0.20	200	28.9	523	351	496.7	27.5
L20d_C	SC	250	250	225	1600	1600	6.4	20 db	<i>Bottom</i>	14	1.0	0.20	200	27.8	523	351	477.8	27.5
L40d_C	SC	250	250	225	1600	1600	6.4	40 db	<i>Bottom</i>	14	1.0	0.20	200	25.8	523	351	443.4	27.5
WILSON																		
S1	SC	160	200	175	850	750	3.75	-	-	12	1.41	0.24	150	40	400	600	256	20.0
S2	SC	160	200	175	650	550	2.75	-	-	12	1.41	0.24	150	40	400	600	256	20.0
S3	SC	160	200	175	550	450	2.25	-	-	12	1.41	0.24	150	40	400	600	256	20.0
COLUMN SPECIMEN																		
L15C	SC	150	160	130	800	640	4	-	-	8	0.8	0.25	150	22.5	443	378	54.4	10.1
L25C	SC	150	160	130	800	640	4	-	-	8	0.8	0.15	250	22.6	443	378	54.4	10.1
M15C	SC	150	160	130	800	640	4	-	-	10	1.3	0.25	150	26.9	443	378	60.2	8.8
M25C	SC	150	160	130	800	640	4	-	-	10	1.3	0.15	250	21.9	443	378	60.2	10.3
L15SB	SC	150	160	130	800	640	4	25 db	<i>Bottom</i>	8	0.8	0.25	150	25.2	443	378	52.4	8.9
L15SM	SC	150	160	130	800	640	4	25 db	<i>Middle</i>	8	0.8	0.25	150	22.1	443	378	52.4	9.9
M15SB	SC	150	160	130	800	640	4	25 db	<i>Bottom</i>	10	1.3	0.25	150	25.4	443	378	60.2	9.3
M15SM	SC	150	160	130	800	640	4	25 db	<i>Middle</i>	10	1.3	0.25	150	25.2	443	378	60.2	9.3

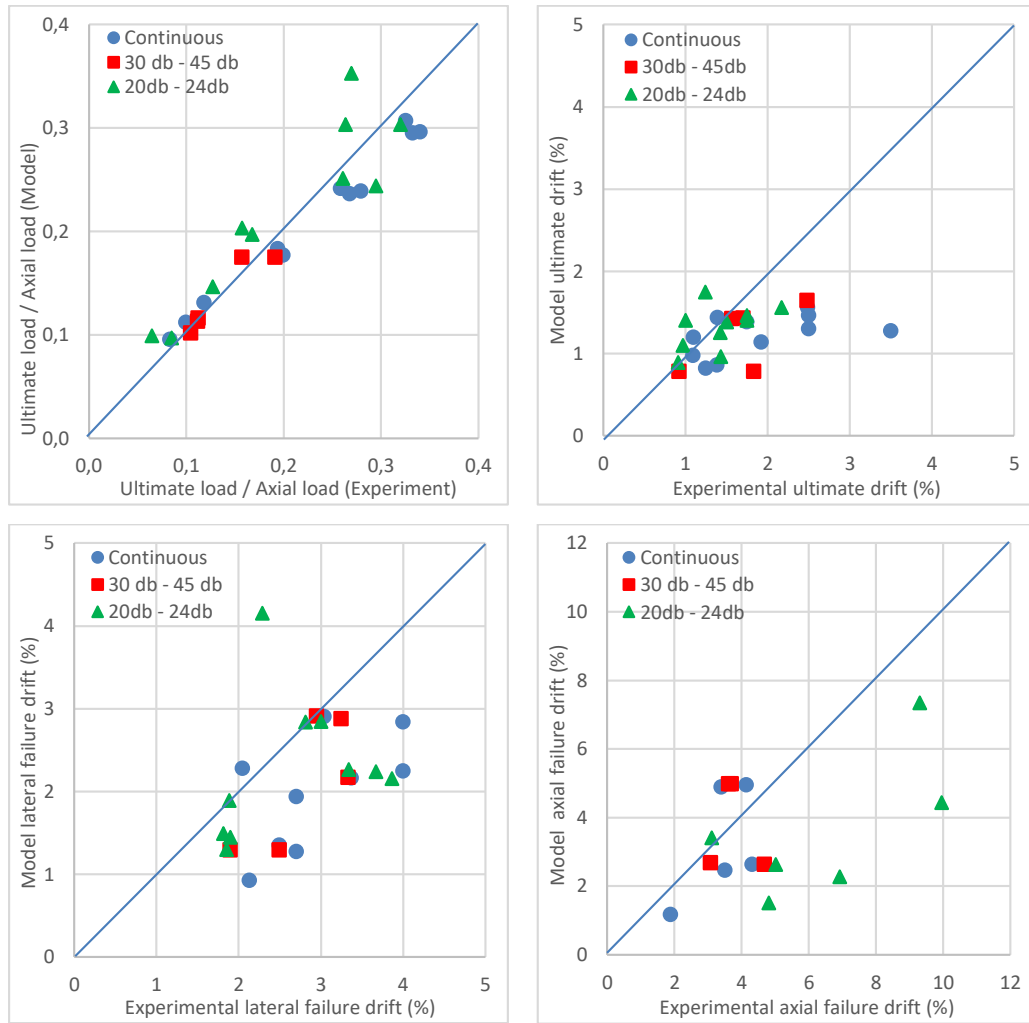




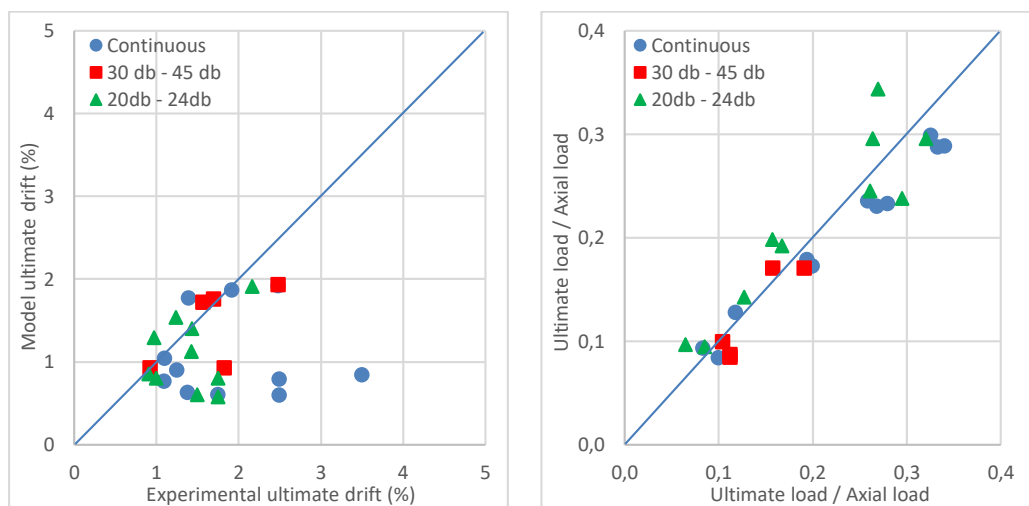




Gambar 4.59 Perbandingan kurva backbone, kurva bilinear dan kurva eksperimental



Gambar 4.60 Perbandingan antara hasil model teoritis metode kurva *backbone* dan eksperimental saat kondisi ultimit dan kondisi kegagalan lateral



Gambar 4.61 Perbandingan antara hasil model teoritis metode kurva *bilinear* dan eksperimental saat kondisi ultimit

Dalam mayoritas kasus, model ultimit dan model kegagalan lateral dari spesimen kolom pada tabel 4.21 menaksir terlalu rendah (*underestimate*) nilai eksperimen, seperti terlihat dalam gambar 4.60. Kurva *backbone* memberikan nilai kapasitas *drift* yang lebih pendek dari hasil eksperimen, namun hal ini dapat diterima dalam konteks desain praktis karena memberikan faktor keamanan yang lebih. Model kurva *bilinear* juga memberikan estimasi konservatif untuk *drift* saat beban puncak (gambar 2.4). *Scatter* data menunjukkan bahwa tiap-tiap kolom pada tabel 4.21 memiliki kapasitas *drift* ultimit hampir sama atau melebihi yang dapat diprediksi oleh model *bilinear*, dimana *drift* ultimit diasumsikan bernilai 2,6 kali *drift* leleh ($\Delta_m = \mu \Omega \Delta_{yu}$; $\mu = 2,0$ dan $\Omega = 1,3$).

Kolom dengan sambungan lewatan pendek (20 db s/d 24 db) dan beban aksial rendah ($n \leq 10\%$) terbukti memiliki respon yang lebih daktail dibandingkan dengan kolom-kolom yang lain. Contohnya adalah pada kolom 2S10M dan SA7N (gambar 1). Kerusakan terpusat di dasar kolom pada kolom tipe seperti ini, dan kegagalan kolom ditentukan oleh kegagalan lekatan (*splitting bond failure*) di sepanjang sambungan lewatan. Pada kedua kasus, tidak terjadi tekuk tulangan longitudinal hingga akhir pengujian (beban telah turun hingga $\pm 20\%$ beban lateral puncak). Observasi hasil eksperimen kolom pada tabel 4.21 juga mengindikasikan bahwa meskipun kolom *flexure dominant* dengan sambungan tidak memadai (*insufficient splice*) mengalami degradasi kekuatan lateral yang tajam akibat kegagalan sambungan, kolom dapat mempertahankan kapasitas beban aksial secara signifikan hingga *drift* yang panjang. Hal ini menyebabkan model *drift* aksial sangat menaksir terlalu rendah (*overly underestimated*) kapasitas aktual *drift* aksial kolom, seperti terlihat di *scatter* data pada gambar 4.61.

Panjang sambungan lewatan mempengaruhi kapasitas beban puncak, dimana kolom dengan panjang sambungan lewatan yang semakin pendek akan mencapai kapasitas puncak yang semakin rendah pula. Kolom dengan sambungan lewatan yang tidak memadai di daerah kritis akan gagal di sambungan sebelum kapasitas puncak teoritisnya tercapai. Perilaku ini menyebabkan model kurve *backbone* dan *bilinear* relatif menaksir terlalu tinggi (*overestimate*) kapasitas puncak aktual kolom (gambar 4.60 dan 4.61). Di lain pihak, kolom dengan sambungan lewatan yang memadai (30db s/d 45db) di daerah kritis justru

mengalami sedikit kenaikan kapasitas puncak, mencapai hingga 10% dari kapasitas teoritisnya (kolom LP, R-OL4 dan L40d_C).

Pemberian sambungan lewatan tulangan longitudinal yang pendek di daerah kritis mengubah perilaku kurva beban-perpindahan kolom. Namun, model kurva *backbone* dan *bilinear* terbukti mampu mengakomodasi perubahan perilaku tersebut, dan memungkinkan perancang bangunan melakukan analisa konservatif performa seismik komponen kolom berdasarkan perpindahan atau *drift*. Namun penyesuaian lebih lanjut masih harus dilakukan dalam pemodelan kapasitas ultimit, dimana terjadi degradasi kekuatan lateral akibat pemberian sambungan tulangan longitudinal yang tidak memadai di daerah kritis.

4.8 Ringkasan

Delapan kolom dengan variabel rasio tulangan longitudinal, rasio tulangan transversal dan letak sambungan lewatan tulangan longitudinal diuji dibawah beban lateral siklik dan beban aksial konstan 10% ($0,1 A_g f'_c$). Kolom diuji dengan penambahan *drift* sebesar 0,25% hingga mencapai *drift* 2,0% kemudian dilanjutkan dengan penambahan *drift* tiap 0,5% hingga kolom mencapai kegagalan lateral. Secara ringkas, hasil penelitian adalah sebagai berikut:

1. Semua spesimen mengalami retak awal berupa retak lentur di daerah sendi plastis atau daerah kritis kolom. Retak awal diprediksi terjadi di *drift* 0.08% pada semua spesimen, jauh lebih kecil dibandingkan hasil eksperimen dimana retak awal terlihat di *drift* 0.25%.
2. Titik leleh pada kurva hasil eksperimen ditentukan sebagai titik pertemuan antara perkiraan garis linear kurva beban-perpindahan pada fase elastis dengan garis horizontal saat beban geser maksimum.
 - a. Spesimen dengan rasio tulangan longitudinal 0,8%, yaitu spesimen L15C, L25C dan L15SM, mengalami leleh pada *drift* 0,7%, 0,78 dan 0,69%, mendekati hasil prediksi *drift* leleh 0,60%. Pengecualian terjadi di spesimen L15SB ($\rho_v=0,8\%$; *bottom lap splice*) dimana titik leleh kolom berada di *drift* 0,9%, hampir dua kali lipat dari hasil prediksi. Hal ini diperkirakan akibat prediksi titik leleh hanya didasarkan pada analisis lentur, sedangkan

hasil pengujian menunjukkan spesimen L15SB mengalami rotasi *slip* yang cukup besar.

- b. Spesimen dengan tulangan longitudinal yang menerus dan rasio 1,1% (spesimen M15C dan M25C) mengalami leleh pada *drift* 1,29% dan 1,15%, hampir 50% lebih tinggi dari hasil prediksi sebesar 0,74% dan 0,78%. Titik leleh spesimen dengan *lap splice* di luar daerah kritis, M15SM, jatuh pada *drift* 0,81%, tidak begitu jauh berbeda dengan hasil prediksi sebesar 0,75%. Sedangkan untuk spesimen dengan *lap splice* di dalam daerah kritis justru mengalami leleh di *drift* 0,55% yang lebih rendah dari hasil prediksi.
3. Hampir semua spesimen kolom mencapai beban puncak yang lebih tinggi dari hasil prediksi.
 - a. Spesimen L15C, L25C, L15SB dan L15SM ($\rho_v=0,8\%$) mencapai beban puncak di *drift* 1,75%, 2,5%, 1,75% dan 1,50% dengan beban lateral puncak masing-masing sebesar 15,2 kN, 14,57 kN, 13,69 kN dan 15,47 kN. Hasil pengujian tersebut lebih besar daripada hasil prediksi *drift* puncak 1,73%, 1,19%, 1,82% dan 1,73% dengan beban lateral puncak 12,98 kN, 12,84 kN, 13,18 kN dan 12,80 kN. Spesimen L15SM (*middle lap splice*) dapat mencapai beban puncak yang hampir sama dengan spesimen L15C (*continuous*) namun dengan *drift* puncak satu siklus lebih rendah. Sedangkan beban puncak spesimen L15SB (*bottom lap splice*) jatuh 10% lebih rendah dari spesimen L15C, namun dapat mencapai *drift* puncak yang sama.
 - b. Spesimen M15C, M25C, M15SB dan M15SM ($\rho_v=1,1\%$) mencapai beban puncak di *drift* 2,5%, 3,5%, 1,0% dan 1,75% dengan beban lateral puncak masing-masing sebesar 19,62 kN, 20,8 kN, 15,89 kN dan 19,30 kN. Hasil pengujian tersebut lebih besar daripada hasil prediksi *drift* puncak 1,37%, 1,18%, dan 1,32% dengan beban lateral puncak 18,48 kN, 17,83 kN dan 18,28 kN. Sama seperti kolom dengan rasio tulangan 0,8%, spesimen dengan sambungan lewatan di luar daerah kritis M15SM dapat mencapai beban puncak yang hampir sama dengan kolom referensi M15C namun di *drift* puncak dua siklus lebih rendah. Spesimen dengan sambungan lewatan

- di dalam daerah kritis M15SB hanya mampu mencapai 80% dari beban puncak kolom M15C dan dengan *drift* puncak yang juga jauh lebih rendah.
4. Perilaku pasca beban puncak dari spesimen kolom dapat dirangkum sebagai berikut.
 - a. Semua kolom, kecuali kolom L25C dan M25C, diuji hingga kolom mengalami kegagalan lateral, yaitu saat beban lateral telah turun sebesar 20% dari beban lateral puncak. Pengujian kolom M25C dan M25C dihentikan sebelum beban turun hingga 80% beban lateral puncak akibat melesetnya *hydraulic jack* (yang berlaku sebagai beban aksial) dari *frame* pengujian. Kolom L15C, L15SB dan L15SM mengalami kegagalan lateral di *drift* 4,0%, 3,67% dan 3,34% sedangkan kolom L25C mengalami penurunan hingga 92% beban lateral puncak di *drift* 3,5%. Kolom M15C, M15SB dan M15SM mengalami kegagalan lateral di *drift* 4,0%, 2,81% dan 3,0% sedangkan kolom M25C masih memiliki 88% dari kekuatan lateralnya di *drift* 4,0%.
 - b. Spesimen dengan ρ_v 1,1% mengalami kegagalan lateral di *drift* yang hampir sama dibandingkan spesimen dengan ρ_v 0,8%, namun leleh pertama terjadi di *drift* yang lebih tinggi. Sementara itu, spesimen kolom dengan detail sambungan lewatan baik di dalam maupun di luar daerah kritis dengan rasio beban aksial yang rendah ($0,1 A_g f'_c$) terbukti mampu bertahan tanpa reduksi kapasitas *drift* yang signifikan. Namun perlu diperhatikan bahwa reduksi kapasitas *drift* akibat detail sambungan lewatan yang tidak memadai (*insufficient lap splice*) semakin besar seiring peningkatan rasio tulangan longitudinal.
 - c. Kolom L15C dan L25C mengalami kegagalan yang didominasi oleh lentur, terlihat dari retak utama berupa retak horizontal di sambungan balok-kolom (*beam-column interface*). Perilaku geser yang dominan belum terlihat pada kedua benda uji. Perilaku geser hanya terlihat dengan berkembangnya retak lentur menjadi retak miring di kedua benda uji, menandakan kapasitas geser sudah mulai tereduksi seiring peningkatan siklus *drift*.

- d. Kolom M15C dan M25C memiliki retak utama berupa retak horizontal di sambungan balok-kolom (*beam-column interface*) yang mengalami bukaan cukup besar di akhir pengujian. Perilaku geser cukup dominan di kolom M25C, sedangkan di kolom M15C perilaku kolom masih lebih didominasi oleh lentur. Pada akhir pengujian di *drift* 4,0%, telah terjadi retak geser menyilang pada kolom M25C dengan bukaan retak yang semakin melebar.
- e. Kolom L15SB dan L15SM menunjukkan kegagalan dengan perilaku yang berbeda. Retak pada kolom L15SB terpusat di sambungan balok-kolom hingga akhir pengujian di *drift* 6,5%, dimana bukaan retak semakin melebar seiring peningkatan *drift*. Bukaan retak yang cukup lebar di akhir pengujian menandakan telah terjadi *slip* di sambungan lewatan yang terletak di dasar kolom (di daerah kritis). Kolom L15SM juga gagal secara lentur namun retak lentur utama bergeser naik sekitar 87 mm dari dasar kolom. Pada akhir pengujian di *drift* 6,5%, telah terjadi retak vertikal di zona tekan dan berujung pada *spalling* selimut beton hingga tulangan longitudinal terlihat. Dengan adanya detail sambungan lewatan yang tidak memadai di luar daerah kritis, retak utama atau sendi plastis kolom menjadi bergeser dan menjauhi sambungan balok-kolom.
- f. Kolom M15SB dan M15SM juga gagal dengan perilaku yang berbeda. Kolom M15SB gagal secara lentur dengan retak utama berupa retak horizontal yang terbentuk di dasar kolom dan 72 mm dari dasar kolom. Pada akhir pengujian di *drift* 5,5%, terlihat adanya *splitting crack* di sepanjang sambungan lewatan di dasar kolom, menandakan adanya *slip* sambungan lewatan tulangan longitudinal. Kolom M15SM merupakan satu-satunya spesimen yang gagal secara geser. Kolom gagal secara tiba-tiba di *drift* 4,5% akibat *diagonal crack* yang memanjang dari grid kelima (250 mm dari dasar kolom) hingga ke *beam-column interface*.

5. Komponen perpindahan yang terdiri dari perpindahan lentur, perpindahan geser dan perpindahan penetrasi leleh diukur dan dapat diringkas sebagai berikut.
 - a. Komponen perpindahan lentur merupakan komponen perpindahan utama di semua spesimen, kecuali spesimen L15SB. Spesimen kolom memiliki komponen perpindahan lentur berkisar antara 60% hingga 80% dari total perpindahan, sedangkan di spesimen L15SB hanya sekitar 40%.
 - b. Komponen perpindahan leleh pada semua spesimen kolom berkisar antara 20% hingga 30% dari total perpindahan, kecuali spesimen L15SB. Spesimen L15SB mengalami perpindahan leleh yang lebih dominan dibandingkan perpindahan lentur, yaitu sekitar 60% dari total perpindahan. Hal ini menunjukkan terjadi rotasi slip yang dominan di spesimen L15SB.
 - c. Komponen perpindahan geser adalah yang paling kecil, hanya berkisar antara 0,4% hingga 3,0% dari total perpindahan. Perpindahan geser yang paling besar terjadi pada spesimen M25C sebesar 3%.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari studi ini adalah sebagai berikut.

1. Mekanisme kegagalan kolom beton bertulangan ringan dengan kekangan yang minim dan atau sambungan lewatan tulangan longitudinal yang tidak memadai adalah:
 - a. Kegagalan pada kolom bertulangan ringan dengan tulangan longitudinal menerus didominasi oleh kegagalan lentur dengan retak utama berupa retak horizontal di titik momen terbesar yaitu di dasar kolom. Hal ini logis karena meskipun kolom didesain dengan kekangan yang minim, kekuatan geser kolom masih 20% lebih tinggi dari kebutuhan geser, sehingga meskipun kapasitas geser kolom telah terdegradasi, ia masih bisa memenuhi kebutuhan gesernya. Di lain pihak, adanya rasio tulangan longitudinal yang rendah, ditambah dengan rasio beban aksial yang juga rendah, memberikan fleksibilitas yang lebih pada kolom dan memungkinkan rotasi sendi plastis yang besar.
 - b. Kolom dengan sambungan lewatan di daerah kritis gagal akibat adanya *slip* tulangan longitudinal. Setelah lekatan mulai melemah, respon simpangan pada spesimen kolom dengan $\rho_v=0,8\%$ didominasi oleh *slip* sambungan lewatan. Kolom dengan rasio tulangan lebih tinggi, 1,1%, tidak menunjukkan respon perpindahan maupun pola retak yang didominasi oleh *slip*, namun kolom gagal secara tiba-tiba pada *drift* yang rendah, menandakan adanya kegagalan akibat *slip* sambungan lewatan tulangan longitudinal.
 - c. Penempatan sambungan lewatan yang tidak memadai di luar daerah kritis mempengaruhi mekanisme kegagalan kolom secara signifikan. Pada kolom dengan rasio tulangan longitudinal yang lebih rendah, $\rho_v=0,8\%$, area kerusakan kolom bergeser menjauhi titik momen terbesar di dasar kolom, namun kegagalan masih akibat lentur.

Peningkatan rasio tulangan longitudinal menjadi 1,1% mengubah mekanisme kerusakan kolom menjadi mekanisme geser, dengan zona kerusakan yang paling luas dibandingkan dengan spesimen kolom yang lain.

2. Pengaruh rasio tulangan longitudinal yang rendah, kekangan yang minim dan atau pemberian sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap kapasitas *drift* kolom beton bertulang yaitu:
 - a. Peningkatan rasio tulangan longitudinal dari 0,8% menjadi 1,1% tidak mempengaruhi kapasitas *drift* kegagalan lateral secara signifikan, namun tulangan longitudinal leleh di *drift* yang lebih tinggi menyebabkan adanya reduksi daktilitas.
 - b. Adanya tingkat kekangan yang lebih minim pada spesimen kolom tidak mempengaruhi kapasitas *drift*. Spesimen didetail dengan tingkat kekangan yang berbeda namun cenderung memiliki kurva hubungan beban lateral – *drift* yang sama. Hal ini diprediksi akibat kekangan pasif yang disediakan tulangan transversal belum bekerja. Selain itu, pemberian beban aksial yang rendah turut mereduksi pengaruh kekangan yang disediakan tulangan transversal.
 - c. Spesimen kolom dengan detail sambungan lewatan baik di dalam maupun di luar daerah kritis terbukti mampu bertahan hingga *drift* yang sedikit lebih rendah dengan spesimen referensi tanpa sambungan (berbeda satu siklus) meskipun mengalami kerusakan yang lebih parah dan residu kekuatan lateral yang jauh lebih rendah. Namun perlu diperhatikan bahwa reduksi kapasitas *drift* akibat detail sambungan lewatan yang tidak memadai tersebut semakin besar seiring peningkatan rasio tulangan longitudinal.
3. Pengaruh rasio tulangan longitudinal yang rendah, kekangan yang minim dan atau pemberian sambungan lewatan tulangan longitudinal terhadap kapasitas lateral kolom beton bertulang yaitu:

- a. Sesuai dengan prediksi awal, peningkatan rasio tulangan longitudinal berdampak pada peningkatan kapasitas lateral spesimen kolom, sedangkan peningkatan rasio volume tulangan transversal dari 0,36% menjadi 0,61% (kenaikan tingkat kekangan kolom) tidak mempengaruhi kapasitas lateral spesimen kolom.
- b. Penempatan detail sambungan lewatan yang tidak memadai di luar daerah kritis tidak menimbulkan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan lentur puncak kolom, namun dapat mereduksi kapasitas *drift* kolom. Adanya detail sambungan yang tidak memadai tersebut juga berujung pada degradasi kekuatan lateral yang menurun dengan lebih cepat akibat kegagalan sambungan lewatan, dimana degradasi semakin menurun tajam dengan peningkatan rasio tulangan longitudinal dari 0,8% menjadi 1,1%.
- c. Kekuatan lentur kolom menurun saat detail sambungan lewatan yang tidak memadai diberikan di daerah kritis (dasar kolom), dan penurunan kekuatan lentur semakin besar dengan kenaikan rasio tulangan longitudinal dari 0,8% menjadi 1,1%. Kekuatan lateral juga semakin menurun tajam (dibandingkan dengan spesimen dengan sambungan lewatan di luar daerah kritis) setelah beban puncak tercapai akibat *slip* di sepanjang sambungan terjadi di titik momen terbesar kolom.
- d. Penggunaan rasio tulangan longitudinal yang lebih tinggi meningkatkan tegangan lekatan (*bond stress*) di sepanjang sambungan, menyebabkan kegagalan sambungan terjadi lebih awal di *drift* yang relatif lebih rendah.
- e. Aplikasi detail non-daktail atau penghematan biaya konstruksi yang berujung pada digunakannya sambungan lewatan tulangan longitudinal yang tidak memadai (*insufficient*) pada kolom beton bertulangan ringan menyebabkan kapasitas lentur kolom dan kekakuan kolom menjadi jauh berkurang akibat dominasi *slip* tulangan longitudinal. Penggunaan sambungan lewatan di daerah kritis disarankan untuk diikuti dengan pemberian kekangan yang daktail di sepanjang sambungan

menggunakan tulangan transversal atau dengan perkuatan yang lain untuk mencegah terjadinya kegagalan sambungan yang prematur.

- f. Penggunaan sambungan lewatan yang tidak daktil di luar daerah kritis tidak dianjurkan karena daerah kerusakan inelastis justru berpindah. Perancang konstruksi akan kesusahan untuk menentukan panjang daerah kritis yang harus diperkuat. Selain itu, mekanisme kegagalan lebih condong ke mekanisme kegagalan geser yang getas, menambah potensi keruntuhan kolom secara tiba-tiba.
4. Kontribusi perpindahan lentur, geser dan penetrasi leleh terhadap perpindahan lateral total kolom beton bertulangan lentur dengan kekangan minim dan sambungan lewatan tulangan longitudinal yang tidak memadai adalah:
 - a. Komponen perpindahan lentur menjadi komponen perpindahan utama yang mendominasi antara 60% hingga 80% dari komponen perpindahan total akibat lentur, sedangkan 20% hingga 30% adalah akibat deformasi *slip* tulangan longitudinal (perpindahan penetrasi leleh). Perpindahan geser relatif sangat kecil, terutama pada fase elastis, namun kemudian mulai bertambah secara signifikan, menandakan adanya degradasi kekuatan geser yang semakin tajam dan deformasi geser yang semakin meningkat. Perilaku tersebut terlihat dengan jelas pada spesimen M25C dan M15SM, dimana retak geser terlihat paling menonjol dibandingkan spesimen yang lain.
 - b. Komponen perpindahan penetrasi leleh menjadi komponen perpindahan utama pada spesimen L15SB, yaitu spesimen dengan sambungan lewatan longitudinal di daerah kritis. Hal ini menunjukkan respon simpangan lateral spesimen didominasi oleh *slip* tulangan longitudinal.

5. Pemberian sambungan lewatan tulangan longitudinal yang pendek di daerah kritis mengubah perilaku kurva beban-perpindahan kolom. Namun, model kurva backbone dan bilinear terbukti mampu mengakomodasi perubahan perilaku tersebut, dan memungkinkan perancang bangunan melakukan analisa konservatif performa seismik komponen kolom berdasarkan perpindahan atau drift. Namun perlu ditekankan bahwa model kurva backbone dan bilinear belum dioptimalkan untuk mengakomodasi pengaruh sambungan lewatan yang tidak memadai terhadap perilaku beban lateral – *drift* kolom beton bertulangan ringan, sehingga penyesuaian lebih lanjut masih tetap harus dilakukan.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan penulis adalah sebagai berikut.

1. Pada studi ini, beberapa spesimen tidak dapat diuji hingga keruntuhan lateral (80% kapasitas lateral puncak) akibat melesetnya *hydraulic jack* dari *frame* pengujian. Metode pengujian yang lebih baik disarankan sehingga kolom dapat diuji hingga gagal.
2. Pemilihan jarak sengkang adalah lebih difokuskan pada kualitas kekangan dan kurang memperhatikan kapasitas gesernya. Akibatnya, spesimen dengan variabel jarak sengkang memiliki perilaku yang hampir sama dan tidak begitu terlihat perbedaannya.
3. Karena keterbatasan alat, desain spesimen kolom tidak menggambarkan kolom tipikal yang ada di lapangan, meskipun perilaku yang didapat diprediksi akan sama dengan kolom tipikal dengan parameter yang sama. Namun, disarankan pengujian lebih lanjut untuk lebih memperhatikan hal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alcantara, P. A. T. & Imai, H. 2000. Failure Mode Classification of Reinforced Concrete Columns by the Analysis of the Strain Distribution in the Main Reinforcement, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland.
- An, X. & Maekawa, K. 1998. Shear Resistance and Ductility of RC Columns after Yield of Main Reinforcement, *Journal of Materials, Constructions, Structures and Pavements*, JSCE. No. 585/V-38: 233-247.
- Bae, S.; Bayrak, O. & Williamson, E. 2004. What Do We Know About The Performance-Based Design of Columns?, *13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, Vancouver, B.C., Canada. No. 997: 1-6.
- Brachmann, I.; Browning, J. & Matamoros, A. B. 2002. Drift Capacity Approach of Rectangular Slender Reinforced Concrete Columns Under Cyclic Loading, *Structural Engineering and Engineering Materials SM Report*, University of Kansas Center for Research, Lawrence, Kansas. No. 68.
- Bournas, D. A. & Triantafillou, T. C. 2011. Bond Strength of Lap-spliced Bars in Concrete Confined with Composite Jackets, *Journal of Composites for Construction, ASCE*.
- Bousias, S.; Spathis, A. & Fardis, M. N. 2006. Concrete FRP Jacketing of Columns with Lap Splices for Seismic Rehabilitation, *Journal of Advanced Concrete Technology* **4** (3): 431-444.
- Bousias, S.; Spathis, A. & Fardis, M. N. 2004. Seismic Retrofitting of Columns with Lap-splices Trough CFRP Jacket, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada.

- Elwood, K. J. & Moehle, J. P. 2003. Shake Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames, *PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) Report 2003/01*, University of California, Berkeley.
- Flores, L. M. 2004. *Performance of Existing Reinforced Concrete Columns Under Bidirectional Shear and Axial Loading*. Unpublished Thesis. University of California, Berkeley.
- Ghosh, K. K. & Sheikh, S. A. 2007. Seismic Upgrade with Carbon Fiber-reinforced Polymer of Columns Containing Lap-spliced Reinforcing Bars, *ACI Structural Journal*.
- Lodhi, M. S. 2012. *Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Columns and Collapse of Buildings*. Unpublished doctoral thesis. The Ohio State University, Columbus.
- Lynn, A. C. 2001. *Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Building Columns*. Unpublished doctoral thesis. University of California, Berkeley.
- McCormac, J. C. & Brown, R. H. 2014. *Design of Reinforced Concrete Ninth Edition*. John Wiley & Sons Inc. Canada.
- Melek, M.; Wallace, J. W. & Conte, J. P. 2003. Experimental Assessment of Columns with Short Lap Splices Subjected to Cyclic Loads, *PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) Report 2003/04*. University of California, Berkeley.
- Mo, Y. L., & Wang, S. J. 2000. Seismic Behavior of RC Columns with Various Tie Configurations, *Journal of Structural Engineering*, October, pp. 1122-1130.
- Pam, H. J. & Ho, J. C. M. 2009. Effects of Steel Lap Splice Locations on Strength and Ductility of Reinforced Concrete Columns, *Advances in Structural Engineering* **13** (1): 199-214.
- Park, R. & Paulay, T. 1975. *Reinforced Concrete Structure*. John Wiley & Sons Inc. Canada.

- Prakash, S. S.; Belarbi, A. & Ayoub A. 2008. Behavior of RC Bridge Columns under Cyclic Flexural-Torsional Loadings with Moderate Shear, *Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering* **2** (83): 1-10.
- Priestley, M.J.N.; Verma, R. & Xiao, Y. 1994. Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Column, *Journal of Structural Engineering, ASCE* **120** (8): 2310-2329.
- Sezen, H. 2002. *Seismic Behavior and Modeling of Reinforced Concrete Building Columns*. Unpublished doctoral thesis. University of California, Berkeley.
- Sotoud, S. & Aboutaha, R. S. 2014. Performance of RC Bridge Columns Subjected to Lateral Loading, *Istanbul Bridge Conference*, August 11-13, 2014.
- Wan, H.; Han, X. & Ji, J. 2010. Analysis of Reinforced Concrete Column by Performance Based Design Method. *Journal of Central South University* **41** (4): 1584-1589.
- Wibowo, A.; Wilson, J. L. & Gad, E. F. 2010. Drift Capacity of Lightly Reinforced Concrete Columns. *Australian Journal of Structural Engineering* **15** (2): 131-150.
- Wibowo, A. 2012. *Seismic Performance of Insitu And Precast Soft Storey Buildings*. Unpublished doctoral thesis. Swinburne University of Technology, Melbourne.